

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

ХВИЛЬОВА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ З ГНУЧКИМ ЕНЕРГОПОГЛИНАЮЧИМ ЕЛЕМЕНТОМ

Навчальний посібник

Рекомендовано Вченою радою НУК

Миколаїв
«Іліон»
2020

УДК 621.311.24:681.5

Х 30

А В Т О Р И :

В. С. БЛІНЦОВ, доктор технічних наук, професор

О. В. БЛІНЦОВ, доктор технічних наук, професор

Г. В. БАБКІН, кандидат технічних наук

А. В. НАДТОЧИЙ, кандидат технічних наук

Т. Х. НГУЄН, кандидат технічних наук

Р Е Ц Е Н З Е Н Т И :

В. М. КАЗАК, професор кафедри автоматизації та енергоменеджменту Національного авіаційного університету, доктор технічних наук, професор;

В. Л. ТИМЧЕНКО, професор кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, доктор технічних наук, професор

*Рекомендовано Вченою радою Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів
(протокол № 1 від 31.01.2020 р.)*

Хвильова електростанція з гнучким енергопоглинаю-
Х 30 чим елементом : навчальний посібник / В. С. Блінцов,
О. В. Блінцов, Г. В. Бабкін та ін. ; за заг. ред. В. С. Блінцова. —
Миколаїв : Іліон, 2020. — 116 с.

ISBN 978-617-534-568-9

Викладено огляд технічних рішень щодо побудови хвильових електростанцій та напрямок удосконалення таких об'єктів морської енергетики на основі гнучких енергопоглинаючих елементів. Наведено відомості про математичне забезпечення для комп'ютерного дослідження функціонування та експериментальні дослідження макета хвильової електростанції. Виконано синтез системи автоматичного керування первинним перетворювачем енергії хвильової електростанції з гнучким енергопоглинаючим елементом.

Для наукових співробітників, спеціалістів, аспірантів та студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальностями 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

УДК 621.311.24:681.5

© В. С. Блінцов, О. В. Блінцов,
Г. В. Бабкін, А. В. Надточий,
Т. Х. Нгуєн, 2020

ISBN 978-617-534-568-9



До 100-річчя
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова

ВСТУП

Хвильові електростанції (ХЕС) є перспективними екологічно чистими джерелами енергії, які на відміну від інших поновлюваних джерел енергії (вітрових, сонячних), мають високу питому концентрацію потужності на одиницю довжини хвилі. Промислово розвинені морські держави (Австралія, Англія, Норвегія, Японія) розробляють ХЕС як альтернативні джерела енергії і як єдино можливі джерела енергії для віддалених морських районів.

У посібнику розглядається ХЕС, що містить два енергетичні модулі, кожний з яких являє собою плаваючу заякорену платформу, на якій розташований гнучкий енергопоглинаючий елемент (ГЕЕ), трансмісія (Тр) у складі робочого вала й підвищувального редуктора, гідронасос (ГН), гідроаккумулятор (ГА), приводна гідротурбіна (ГТ), синхронний генератор (СГ) і загальний для СГ підвищувальний трансформатор, що передає електроенергію береговим споживачам по підводному кабелі.

Характерною рисою ХЕС є нестабільність характеристик морських хвиль у часі, обумовлений часом доби, сезонністю та ін. Це істотно знижує її річну продуктивність, тому одним з головних завдань керування таким об'єктом енергетики є синтез адаптивних систем автоматичного керування (САК), що забезпечують максимальне знімання гідралічної енергії з хвилі при зміні її характеристик.

Крім того, комерційне застосування ХЕС істотно залежить від масогабаритних характеристик конструкції й вартості її енергетичного встаткування. Одним зі шляхів зниження цих показників може бути виключення зі складу ХЕС підвищувального трансформатора, встановлена потужність якого дорівнює потужності ХЕС. Необхідне підвищення напруги ХЕС при цьому може бути досягнуте за рахунок електрично послідовного включення статорних обмоток СГ обох енергетичних модулів ХЕС. Стійка робота таких об'єктів при цьому повинна забезпечуватися відповідною САК.

У навчальному посібнику розглядаються питання синтезу такої САК.

1 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ХВИЛЬОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ І ОСОБЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ НИМИ

1.1 Огляд і критичний аналіз сучасних хвильових електростанцій

Хвильові електростанції (ХЕС) є перспективним джерелом екологічно чистої енергії, розробці яких у світі приділяється велика увага протягом більш 30 років [1-6]. В основі їх роботи лежить вплив хвиль на робочі органи, виконані у вигляді поплавців, маятників, лопат, оболонок і т.п. Механічна енергія їх переміщень за допомогою електрогенераторів перетворюється в електричну енергію [7, 8].

Створення ХЕС визначається вибором акваторії моря зі стійким запасом хвильової енергії, ефективною конструкцією станції, у яку вбудовані механізми перетворення механічної енергії в електроенергію. Вважається, що ефективно хвильові станції можуть працювати при використанні потужності близько 50-70 кВт/м [9-11]. Досвід експлуатації існуючих установок показує, що вироблювана ними електроенергія поки в 2-3 рази дорожче традиційної, але в майбутньому очікується значне зниження її вартості.

Сьогодні хвильова енергія вже використовується в промислових масштабах, тому що ХЕС використовуються для живлення малопотужних споживачів (морських навігаційних споруджень) і для комерційного продажу електроенергії в берегову мережу [12, 13]. Однак, обсяги практично виробленої за допомогою ХЕС електроенергії на сьогодні усе ще невеликі – за різними даними 0,5...1,5% від усього кількості електроенергії, виробленої тепловими, атомними й гідроелектростанціями [14, 15]. Це пояснюється високою складністю виготовлення й експлуатації ХЕС, а також недостатньо високою ефективністю таких електростанцій при роботі в умовах невизначеності параметрів зовнішнього середовища [16-18]. У зв'язку із цим, підвищення ефективності ХЕС шляхом створення установок, здатних адаптуватися до мінливих умов морського середовища, є актуальним прикладним науково-технічним завданням.

У складі ХЕС звичайно виділяють два контури: перший сприймає механічний вплив хвиль і перетворює їхню роботу в потенційну або кінетичну енергію робочого тіла (найчастіше рідкого або газоподібного). У другому контурі відбувається перетворення енергії робочого тіла в електроенергію (звичайно за допомогою турбін) [19-21].

Конструктивно ХЕС різняться між собою, в основному, побудовою першого контуру. Із цієї позиції можна виділити дві групи станцій: установки, у яких хвилі впливають безпосередньо на робоче тіло, і установки, у яких вплив хвиль передається через проміжну ланку, яка, використовуючи властивість важеля, стискає робоче тіло.

Для перетворення енергії хвиль у механічну використовуються наступні хвильові ефекти [22]: зміна рівня хвилі; поздовжні коливання рідини; швидкість рух рідини; зміна нахилу вільної поверхні; почергове згинання слідом за вільною поверхнею; гідродинамічний тиск; змінний гідростатичний тиск.

До основного виду перетворювача на основі першого ефекту належить система І.А. Бабінцева й Масуди [23]. Вона має відкриту вниз порожнину, рівень води в якій коливається під дією минаючих хвиль. У це коливне водне середовище поринає гідротурбіна, що перетворює змінний рух води в механічну енергію. Більш ефективна пневматична схема, при якій використовуються коливання тиску у верхній частині порожнини (рис. 1.1,а). У цьому випадку, на верхній частині порожнини встановлюється на патрубку повітряна турбіна й генератор. Між генератором і стінкою корпусу є кінцевий канал, що дозволяє повітрю виходити з камери в атмосферу при підйомі рівня й навпаки.

Недоліком цієї системи є мала потужність і низький ККД. Збільшення потужності системи значно впливає на масу станції.

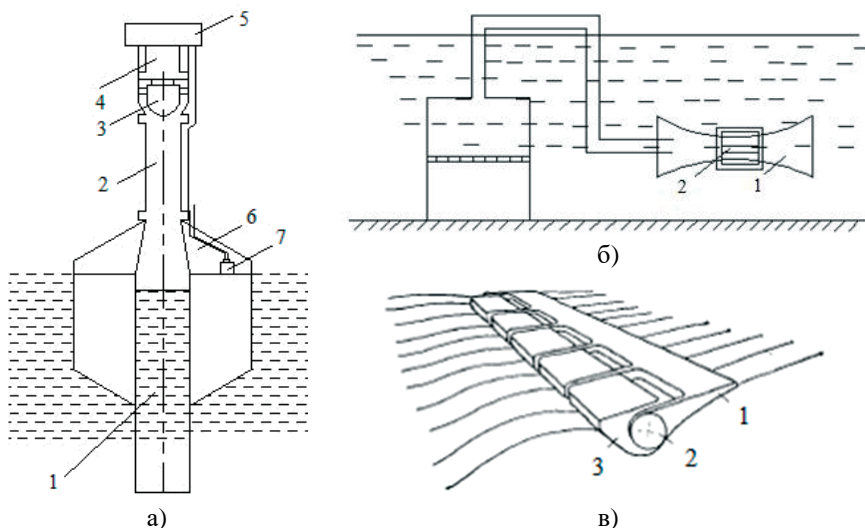


Рис. 1.1 – Основні принципи роботи ХЕС: а – перетворювач коливань рівня з повітряною турбіною: 1 – порожнина; 2 – патрубок; 3 – повітряна турбіна; 4 – генератор; 5 – маяк; 6 – повітряна порожнина; 7 – акумулятор; б – перетворювач Ф. Генделя: 1 – сопло; 2 – турбогенератор; в – «Качка Солтера»: 1 – асиметричний поплавць; 2 – циліндрична опора з розміщеними в ній приводами і електрогенераторами; 3 – плавуча платформа.

На основі другого ефекту використовують кінетичну енергію горизонтального переміщення води при хвилюванні й пов'язане із цим зворотнопоступальне переміщення. На практиці цей принцип реалізований у системі Ф.Генделя (рис. 1.1,б). Рідина в системі рухається через сопло певної форми, у якому встановлена турбогенератор або МГД-генератор [24]. Недоліком цієї системи є труднощі керування положенням станції до напрямку горизонтального переміщення води, щоб забезпечити максимального відбір енергії; система також має низьку ефективність.

На основі третього ефекту використовують поверхневу швидкість руху гребеня хвилі. Тут класичним представником може слугувати перетворювач С.Солтера (рис. 1.1,в), що має дуже високу ефективність перетворення енергії хвиль (близько 80%) [25]. Він містить у собі ексцентричні поплавці, які під дією хвиль роблять зворотно-поступальний рух відносно валу. Цей рух трансформується насосом у тиск робочої рідини – води або масла. Уся конструкція кріпиться на плавучій платформі.

Найбільш серйозними недоліками для ХЕС типу «качка Солтера» виявилися наступні: необхідність передачі повільного коливального руху на привод генератора; необхідність зняття потужності із плаваючого на значній глибині пристрою великої довжини; внаслідок високої чутливості системи до напрямку хвиль необхідність відслідковувати зміну їх напрямку для одержання високого ККД перетворення; труднощі при зборці й монтажу через складність форми поверхні «качки».

Класичним перетворювачем четвертого й п'ятого ефектів можна вважати контурний пліт У. Коккерелла, що представляє собою багатоланкову систему з декількох шарнірно з'єднаних секцій [26]. У цій системі пліт встановлюється перпендикулярно фронту хвилі й відслідковує її профіль (рис. 1.2,а).

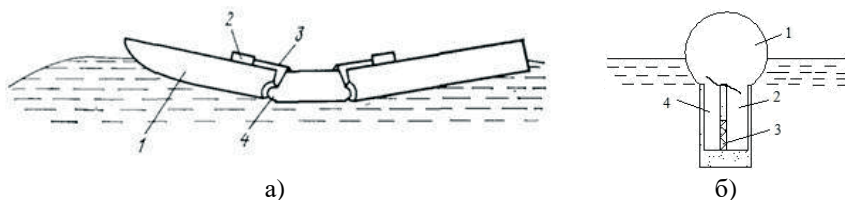


Рис. 1.2 – Основні принципи роботи ХЕС: а – варіант виконання контурного плота Коккереля: 1 – коливна секція; 2 – перетворювач; 3 – тяга; 4 – шарнір; б – пружна оболонка М. Френча: 1 – пружна оболонка; 2 – впускна труба; 3 – турбіна; 4 – випускна труба.

Основні недоліки таких перетворювачів: висока матеріалоемність; середньорічний коефіцієнт використання потужності не більш 0,4; високий рівень питомих капітальних витрат.

В основі шостого й сьомого ефектів лежить використання змінного тиску, що виникає при проходженні хвилі (пружна оболонка М.Френча, рис. 1.2,б). Основу перетворювача складає пружна оболонка, що деформується під дією мінливого тиску [27, 28]. При стиску оболонки повітряний потік з великою швидкістю рухається по впускній трубі, приводячи в обертання турбіну, і виходить по випускній трубі. Недоліки таких перетворювачів – низький ККД і більша матеріалоемність.

До основних експлуатаційних показників ХЕС можна віднести: характеристики морських хвиль (довжина, висота, швидкість поширення); місце установки (морські, берегові); проектна потужність; конструктивна складність (металоемність, особливості монтажу); рівень автоматизації; ціна виробленої електроенергії. Слід зазначити, що деякі із зазначених вище показни-

ків безпосередньо в літературі не приводяться, тому в роботі замість них дані узагальнені словесні характеристики, близькі по суті.

Основні типи ХЕС і їх короткі описи наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Зведені показники існуючих ХЕС

Характеристики Тип	Умови роботи	Місце встановлення	Потужність, МВт	Адаптація до зовнішніх умов	Складність побудови	Ціна 1 кВт·година
AWS (хвильовий маятник Архімеда)	При великих хвилях	На морі	0,5	Немає	Складно	0,27€
OWC (осцилююча водяна колона)	При великих хвилях	На березі	0,5	Немає	Складно	0,14 €
Wave Dragon (хвильовий дракон)	При великих хвилях	На морі	4-7	Немає	Складно	0,07-0,11 €
ТАРЧАН (канал, що звужується)	При великих хвилях	На березі	0,5	Немає	Складно	Немає даних
«Качка Солтера»	При великих хвилях	На морі	0,5	Немає	Складно	Немає даних
«Пліт Коккереля»	При великих хвилях	На морі	21,0	Немає	Складно	0,23€
Pendulor (хитний маятник-перетворювач)	При малих хвилях	На березі	0,5	Немає	Просто	Немає даних
Wave Star	При серед. і великих хвилях	На березі	0,018 – 24	Немає	Складно	Немає даних
Зі спіральним плаваючим ротором	При серед. і малих хвилях	На морі	0,5-2,0	Немає	Просто	0,05-0,08\$

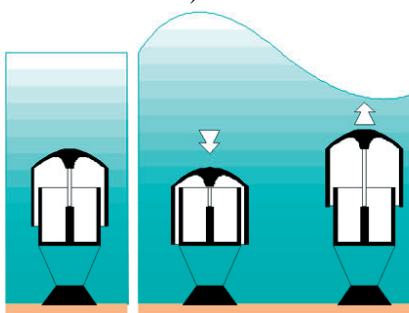
Аналіз наведених технічних рішень ХЕС і реально досягнутих ними техніко-економічних характеристик показує, що їм характерні наступні недоліки: система «AWS» (рис. 1.3) працює тільки на гігантських океанських хвилях і вимагає постійної їхньої наявності на місці установки ХЕС; система «OWC» (рис. 1.4) має низький ККД і більшу матеріалоемність, її ефективність залежить від географічного розташування обраного місця й зменшується біля берегової лінії в порівнянні з глибоководними умовами відкритого моря.



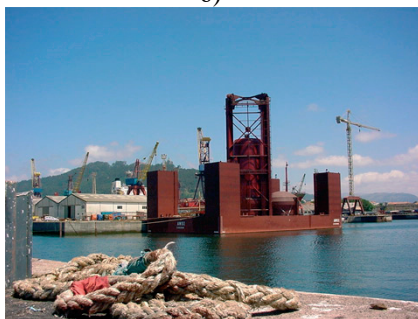
а)



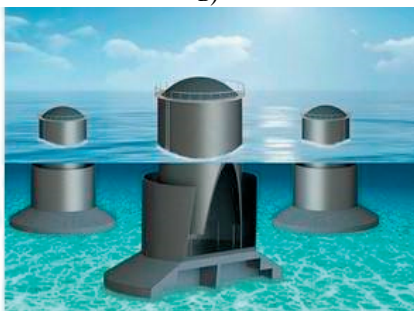
б)



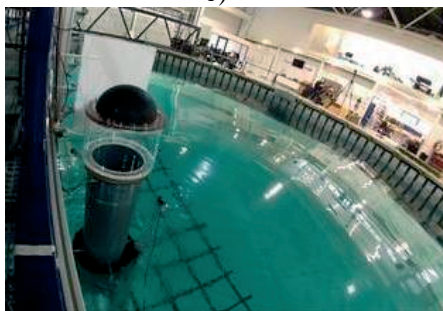
в)



г)



д)



е)

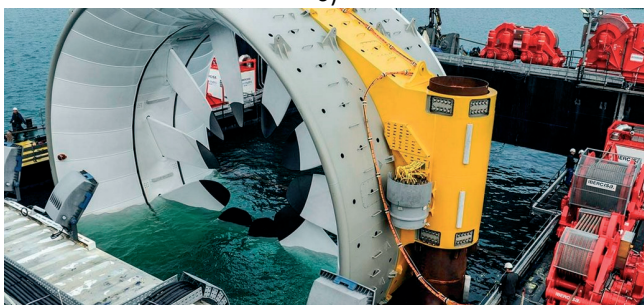
Рис. 1.3 – ХЕС типу AWS (Архимедов хвильовий маятник):
а – хвильова AWS ферма; б – пружна оболонка М. Френча; в – принцип дії;
г – транспортування АWR до місця установки; д – проект діелектричного
еластомірного генератора (DEG); е – зборка DEG



а)



б)



в)

Рис. 1.4 – ХЕС типу OWC: а – електростанція «Oceanlinx» (Австралія);
б – станція Ocean Buoy потужністю 1,25 МВт на іспитовому полігоні
ВМС США на Гавайях; в – турбіна Ocean Buoy.

Системи типу «Wave Dragon» (рис. 1.5) і «ТАРЧАН» (рис. 1.6) мають складні механізми перетворення енергії й низький ККД, громіздкі й складні у виготовленні й експлуатації; система «Качки Солтера» (рис. 1.7) характеризується складністю виготовлення й монтажу, чутлива до ударних навантажень при впливі максимальних хвиль і має невисокий ККД.



Рис. 1.5 – ХЕС типу «Wave Dragon» (хвильовий дракон). Випробування прототипу в Данії.

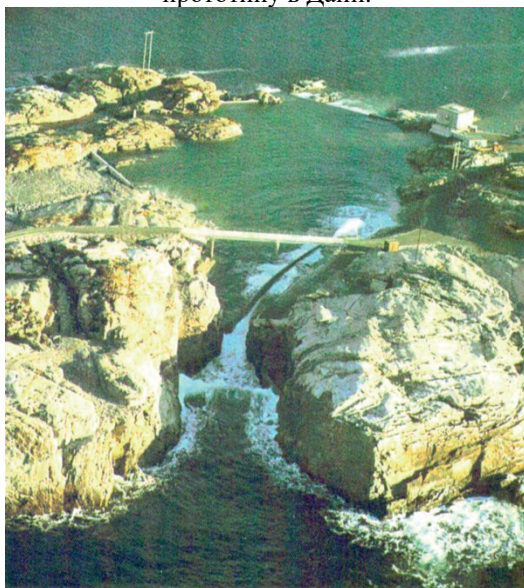


Рис. 1.6 – ХЕС типу ТАРСНАН (канал, що звужується) біля міста Берген (Норвегія)



а)



б)

Рис. 1.7 – ХЕС типу «Качка Солтера» потужністю 45 МВт біля західного берега Британських островів: а – пристрій поплавця; б – принцип роботи.

Система «Pelamis» (рис. 1.8) має високу матеріалоємність, середньорічний коефіцієнт використання потужності не більш 0,4 і високий рівень питомих капітальних витрат (близько 6000 \$/кВт); система «Pendulor» є пристроєм з недостатньою надійністю, виготовляються тільки малопотужні, невеликі по розмірах ХЕС; система «Wave Star» (рис. 1.9) має проблеми, схожі із системою «Pelamis», а саме високу матеріалоємність і складну технологію побудови.



а)



б)

Рис. 1.8 – ХЕС типу «Pelamis»: а – перетворювач «Pelamis» (морський змій);
б – хвильова ферма 2,25 МВт Агусадор (Португалія).



а)



б)

Рис. 1.9 – ХЕС типу «Wave Star»: а – проект експериментальної установки в Північному морі біля мису Ханстхольм (Данія); б – поплавковий елемент.

ХЕС зі спіральним плаваючим ротором, маючи переважне застосування на акваторіях з малими й середніми хвилями, позбавлено багатьох згаданих вище недоліків [29, 30]. Для неї характерні: низький рівень питомих капітальних витрат (3500-4000 \$/кВт), низька собівартість виробленої електроенергії, низька матеріалоемність (до 150 кг/кВт), висока стійкість у штормовому морі, мобільність встановлення в будь-якій точці акваторії.

Однак, при безлічі принципових конструкторських рішень для всіх видів ХЕС є один загальний недолік, який обмежує ефективність їх застосування. Це – відсутність властивості адаптації до мінливих зовнішніх умов морського середовища й, у першу чергу, до нестационарності параметрів морських хвиль – довжини, амплітуди й частоти проходження (швидкості поширення) хвиль. Це суттєво знижує загальну ефективність застосування ХЕС.

В 2009 році в берегів Оркнейських островів, у північній частині Шотландії, було запущено ще одне унікальне спорудження, що виробляє енергію завдяки хвилям Північного моря. Це розроблений і побудований Единбурзькою компанією Aquamarine Power, генератор «Oyster», що в перекладі означає «Устриця» (рис. 1.10).



а)



б)

Рис. 1.10 – ХЕС типу «Oyster»: а - принцип роботи;
б - поплавковий елемент.

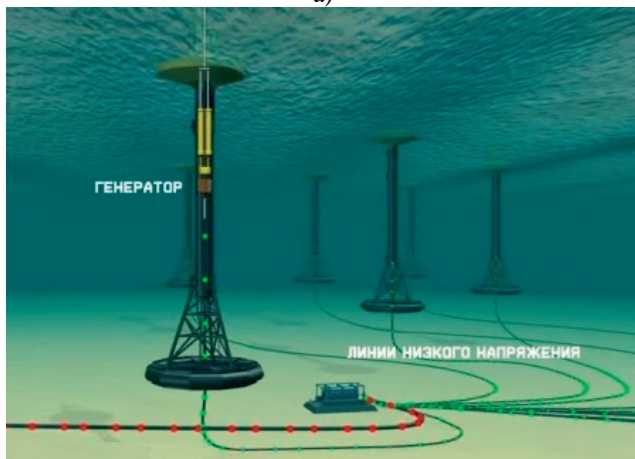
Проект являє собою великий поплавець-насос, який розгойдується хвилями вперед та назад, і приводить, таким чином, у рух двосторонній насос, розташований на дні, на глибині близько 16 метрів.

Особливість конструкції в тому, що вся електрична частина пристрою винесена на берег, а зв'язок між цими двома частинами – поплавцем-насосом і береговою електростанцією – здійснюється через трубу, по якій морська вода під тиском спрямовується до гідроелектрогенератора.

У тому ж 2009 році у Великобританії, біля узбережжя Корнуолла, почалося будівництво комплексу хвильових генераторів Wave Hub, які з'єднуються з берегом за допомогою силового кабелю (рис. 1.11).



а)



б)

Рис. 1.11 – ХЕС типу Wave Hub: а - електростанція біля міста Хейлі (Великобританія); б - структура електростанції.

Комплекс генераторів марки Powerbuoy, американської компанії Ocean Power Technologies, працює за рахунок вертикального переміщення поплавців, які сковзають по колонах, заякореним на дні. Глибина, де встановлені колони, становить 50 метрів, а загальна потужність системи з 400 буїв складе в підсумку 50 МВт.

Буї влаштовані в такий спосіб. Колона містить усередині генератор, який за рахунок системи поршнів приводиться в рух, і виробляє електрику, коли буй коливається на хвилях. Електричний струм від кожного буя передається по проводах на підводну підстанцію, від якої силовий кабель передає електроенергію на сушу.

Розглянемо тепер перспективи створення ХЕС для використання на акваторіях Чорного моря як основного джерела хвильової енергії для України. На морській акваторії можливе існування вітрових хвиль максимальною висотою до 5,1-20,0 метрів (див. табл. 1.2) [31]. Однак, такі хвилі утворюються надзвичайно рідко. Хвилі з 3-відсотковою й більшою забезпеченістю мають висоту 1,5-3,0 метра.

Таблиця 1.2 – Характеристики хвиль Чорного моря

Висота хвиль, м	Повторюваність по місяцях і річна, %												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Рік
0.0-0.5	40.7	41.0	47.7	62.2	71.4	68.9	62.7	58.4	54.7	48.2	43.7	39.2	53.3
0.6-1.0	23.6	23.9	23.6	21.0	17.4	18.9	21.4	22.7	22.7	23.9	24.8	24.9	22.4
1.1-1.5	15.6	15.8	14.1	9.1	6.8	7.4	9.5	11.0	11.9	13.3	14.8	16.3	12.1
1.6-2.0	9.4	9.5	7.3	4.2	2.8	3.0	4.0	4.9	6.3	7.5	8.2	9.4	6.4
2.1-2.5	4.6	4.2	3.2	1.7	0.9	1.0	1.6	1.7	2.1	3.3	4.1	4.5	2.7
2.6-3.0	3.4	2.9	2.0	0.9	0.4	0.4	0.5	0.8	1.2	2.1	2.6	3.0	1.7
3.1-3.5	0.8	1.2	0.6	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	1.0	0.5
3.6-4.0	1.2	0.8	0.7	0.3	0.1	0.2	0.2	0.1	0.4	0.6	0.7	0.9	0.5
4.1-4.5	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1
4.6-5.0	0.3	0.3	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1
5.1-20.0	0.2	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1

Це дозволяє говорити про доцільність створення морських ХЕС для Чорного моря, розраховані на малі й середні хвилі.

Попередній аналіз існуючих принципів побудови ХЕС і досвід авторів по проектуванню адаптивних систем керування дозволили вибрати в якості базового варіанта ХЕС для роботи на Чорному морі електростанцію із гнучкими енергопоглинаючими елементами [32, 33].

1.2 Короткий аналіз морських хвиль як джерела гідравлічної енергії

Від морських хвиль можна одержати величезні кількості екологічно чистої енергії. Потужність, яка переноситься хвилями на глибокій воді, пропорційна квадрату їх амплітуди й періоду [34]. Тому найбільший інтерес представляють довгоперіодні (7~10с) хвилі великої амплітуди (~2м), що дозволяють знімати з одиниці довжини гребеня в середньому від 50 до 70 кВт/м.

Переваги хвильової енергії полягають у тому, що вона досить сильно сконцентрована, доступна для перетворення й на будь-який момент часу може прогнозуватися залежно від погодних умов. Створюючись під дією вітру, хвилі добре зберігають свій енергетичний потенціал, поширюючись на значні відстані.

Найбільше число хвильових енергетичних пристроїв розробляється для добування енергії із хвиль на глибокій воді. Це найбільш загальний тип хвиль, що існує за умови, що середня глибина моря D перевищує величину половини довжини хвилі $\lambda/2$. Амплітуда кругового руху води із глибиною зменшується експоненційно і стає малою при $D \geq \lambda/2$. У хвилі на мілководді частки рухаються по еліптичних орбітах, рух охоплює придонний шар, приводячи до дисипації енергії хвилі.

Поверхневі хвилі на глибокій воді мають характерні особливості - вони є неруйнівними синусоїдальними з нерегулярною довжиною, фазою і напрямком приходу [35]. Рух кожної частки рідини у хвилі є круговим. У той час як мінливі обриси води свідчать про поширення хвильового руху, самі по собі частки не пов'язані із цим рухом і не переміщуються в його напрямку.

Суттєво, що амплітуда хвилі a не залежить від її довжини λ , швидкості поширення c , періоду T , а залежить лише від характеру попереднього взаємодії вітру з морською поверхнею. У приповерхньому шарі частки води роблять круговий рух з радіусом орбіти a , рівним амплітуді хвилі (рис. 1.12).



Рис. 1.12 – Характеристики приповерхневих морських хвиль:
а - по горизонталі; б - по глибині.

Висота хвилі H від вершини гребеня дощенту рівна її подвоєній амплітуді ($H=2a$).

Теоретично аналіз хвильового руху в рідині досить важкий, однак він детально виконаний у ряді спеціальних видань [36-38]. Тут з теорії використані лише ті результати, які необхідні для розуміння роботи найбільш простих хвилюєнергетичних пристроїв.

Для хвиль на глибокій воді сили тертя, поверхневого натягу й інерції малі в порівнянні із двома домінуючими силами – гравітаційною й обертальною. Тому водна поверхня завжди приймає таку форму, щоб дотична до неї в

будь-якій точці була перпендикулярна напрямку дії результуючої цих двох сил. У хвилях на глибокій воді немає поступального руху рідини [39].

Нехай $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число. Очевидно, що рух поверхні описується так само, як і переміщення її в просторі за умови, що

$$\lambda = 2\pi g/\omega^2. \quad (1.1)$$

Це співвідношення встановлює залежність між частотою й довжиною для поверхневої хвилі на глибокій воді [9, 40].

Період руху хвилі $T = 2\pi/\omega = 2\pi/(2\pi g/\lambda)^{1/2}$. Отже,

$$T = \sqrt{(2\pi\lambda / g)}. \quad (1.2)$$

Швидкість переміщення хвиль на поверхні в напрямку x :

$$c = \sqrt{g\lambda / 2\pi}. \quad (1.3)$$

Швидкість « c » називають фазовою швидкістю поширення хвиль, які створюються на поверхні рідини. Слід зазначити, що ця величина не залежить від амплітуди хвилі й неявним чином пов'язана зі швидкістю руху часток рідини у хвилі.

Для частки води, що перебуває на відстані z від середнього положення рівня поверхні, радіус кругової орбіти r визначається [9, 40]:

$$R = aekz, \quad (1.4)$$

де a – амплітуда, м; k – хвильове число; z – положення частки щодо середнього рівня поверхні, м.

Для положення нижче середнього рівня поверхні z – негативна величина.

Нехай E_k – повна кінетична енергія, тоді повна кінетична енергія на одиницю ширини хвильового фронту й одиницю довжини уздовж напрямку поширення хвилі рівна [40, 41]:

$$E_k = \rho a^2 g / 4, \quad (1.5)$$

де ρ – питома густина води, кг/м³.

Нормована потенційна енергія хвилі рівна в точності такій же величині

$$E_n = \rho a^2 g / 4.$$

Повна енергія на одиницю площі поверхні хвилі дорівнює сумі кінетичної й потенційної енергій:

$$E = E_k + E_n = E_k = \rho a^2 g / 2. \quad (1.6)$$

Потужність, яка переноситься в напрямку поширення хвилі на одиницю ширини хвильового фронту, визначається виразом [40, 41]:

$$P = \rho g a^2 \lambda / 4T. \quad (1.7)$$

Потужність P дорівнює повній енергії (кінетична й потенційна) E в хвилі на одиницю площі поверхні, помноженій на групову швидкість хвиль на глибокій воді $u = c/2$, з якої хвилі переносять енергію. З урахуванням виразу для групової швидкості

$$P = \rho g a^2 c / 4. \quad (1.8)$$

і, отже, фазова швидкість

$$c = \omega/k; \quad c = \lambda/T. \quad (1.9)$$

Відмінність між груповою і хвильовою (фазовою) швидкостями є загальним для будь-яких хвильових процесів, для яких фазова швидкість залежить від довжини хвилі [40, 41].

Отже, потужність, яка переноситься хвилями, збільшується прямо пропорційно квадрату амплітуди й періоду хвиль. Тому особливо ефективними для одержання електроенергії довгоперіодні хвилі океанської брижей, що мають значну амплітуду.

Аналіз науково-технічної літератури показує, що розвиток хвильової енергетики сполучене з наступними труднощами: хвилі нерегулярні по амплітуді, фазі й напрямку руху; у штормових умовах утворюються хвилі дуже великої інтенсивності, тому під час штормів конструкції ХЕС повинні витримувати навантаження, приблизно в 100 раз більші, ніж при нормальній роботі; існує проблема високої матеріалоемності конструкцій ХЕС і високої вартості підводних кабелів, по яких електроенергія передається на берег.

На сьогодні у світовій практиці спостерігається прагнення створювати лише великі хвильові електростанції в місцях з високим хвильовим потенціалом. Враховуючи характеристики морського хвилювання на Азово-Чорноморському басейні, представляється актуальним створювати ХЕС для зон з помірними енергетичними потенціалами, де найчастіше використання хвильової енергії виявляється економічно більш виправданим.

1.3 Удосконалювання структури ХЕС із гнучкими енергопоглинаючими елементами

Відомо [30, 32, 33], що ХЕС із гнучким енергопоглинаючим елементом (ГЕЕ) – плаваючим ротором у вигляді гнучкого поздовжнього тіла – сконструйована так, що при проходженні хвиль відносні переміщення окремих обсягів води сприймаються ГЕЕ в результаті дії гідродинамічного напору, який створює крутий момент на робочому валу. Цей момент перетворюється й передається трансмісією на вал електрогенератора.

Конструкція ХЕС із ГЕЕ показана на рис. 1.13 [33].

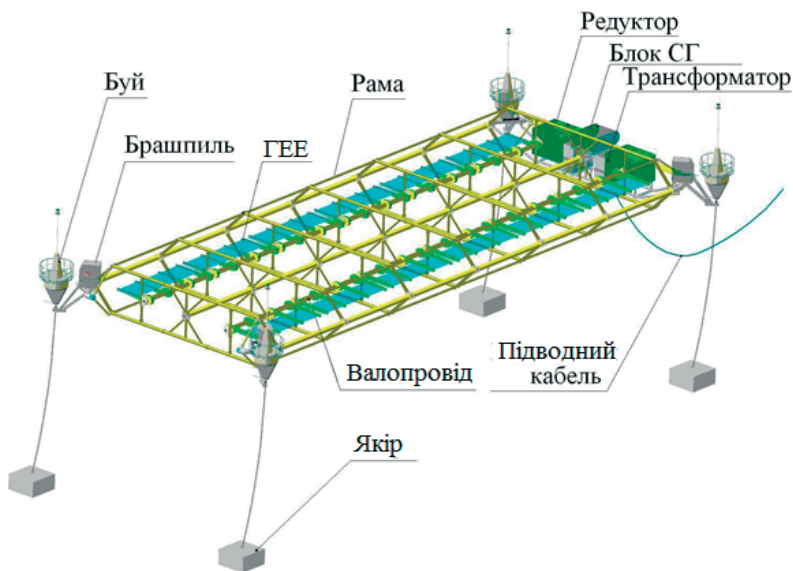


Рис. 1.13 – Конструкція ХЕС з гнучкими енергопоглинаючими елементами

Складові частини платформи ХЕС: несуча конструкція (рама); навігаційні буй; брашпили, якір-ланцюг і якорі для закріплення ХЕС у заданій акваторії; система ГЕЕ; робочі вали (трансмсії) з редукторами; гідроакумулятор; синхронні генератори; підвищувальний трансформатор; підводний кабель; система автоматичного керування. При цьому ГЕЕ має фіксовану довжину й при зміні довжини морських хвиль радіус плаваючого ротора змінюється, що приводить до зниження енергетичної ефективності ХЕС.

Для забезпечення максимального відбору енергії хвилі при зміні її довжини в широких межах пропонується до складу ХЕС із гнучким плаваючим ротором увести механізм автоматичного регулювання довжини ГЕЕ [42]. У цьому випадку ГЕЕ приймає форму хвилі, що забезпечує максимальний крутний момент на валу й, відповідно, максимальну енергоефективність при зміні довжини хвиль у широких межах (рис. 1.14).

На рис. 1.14,а представлена принципова схема такої ХЕС із автоматичною зміною довжини ГЕЕ при спокійній водній поверхні, на рис. 1.14,б – при хвилювій водній поверхні з малою довжиною хвилі, на рис. 1.14,в – з великою довжиною хвилі.

Як впливає із рис.1.14, конструктивно ХЕС складається із платформи 1, робочого органа (ГЕЕ) 2, напрямних 3, у яких установлений ГЕЕ, храпових механізмів 4, встановлених на кожній з напрямних вала 5 із храповиками 4, трансмісії 6, електричного генератора 7, які встановлено на понтонах 8 і 17.

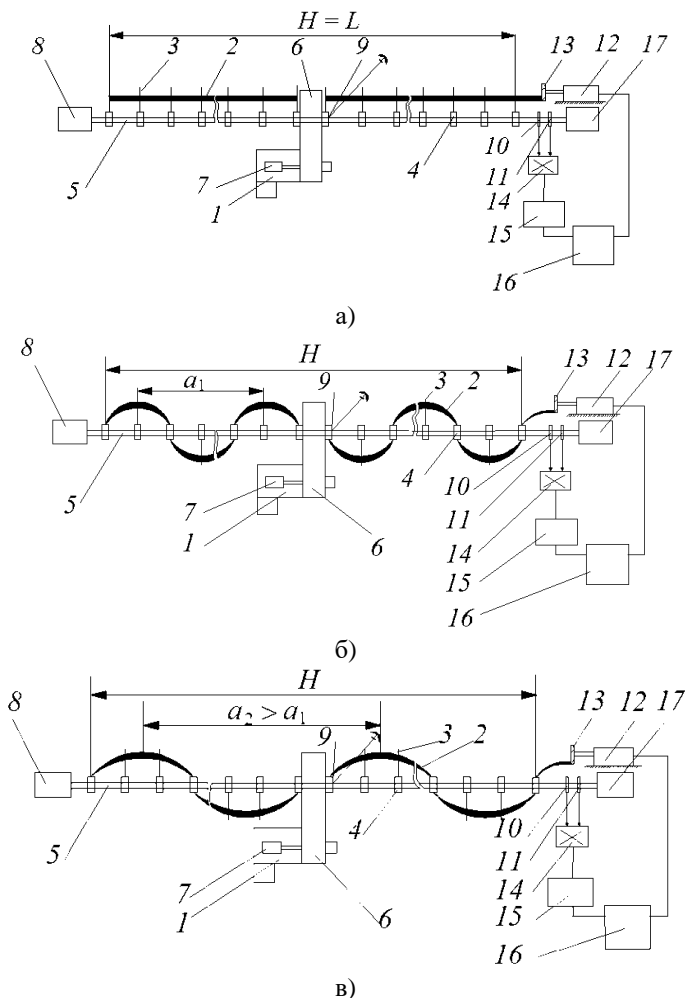


Рис. 1.14 – ХЕС з автоматично змінною довжиною ГЕЕ

На понтонах розташовані також якірна опора 9, датчик моменту M на валу 10, датчик кутової частоти обертання вала ω 11, електропривод з гальмом 12, барабан 13, з'єднаний з електроприводом і містить ділянку ГЕЕ, що витравлюється/вибирається. Блок множення 14, обчислювач 15, підсилювач 16 входять у систему керування ГЕЕ, з'єднані послідовно й підключені до датчиків і до електропривода. Інший кінець пристрою закріплено на понтоні 17.

У напрямних уздовж вала розміщений ГЕЕ (у вигляді стрічки, що радіально сковзає в напрямних), який під впливом хвилі, що набігає, приймає форму хвилі з довжиною L . Крутний момент, що виникає від впливу хвилі, що набігає, від ГЕЕ передається через напрямні, храпові механізми, вал і трансмісію в електрогенератор, де виробляється електроенергія. Храпові ме-

ханізми, встановлені на валу й напрямних, забезпечують обертання вала в одному напрямку. Понтони забезпечують стійкість і необхідну плавучість платформи, яка утримується якорями.

Система автоматичного керування, що містить датчики, з'єднані із блоком множення, обчислювачем і підсилювачем, забезпечує встановлення (витравлювання/вибирання) оптимальної довжини L_{opt} ГЕЕ за допомогою електропривода з гальмом і барабана, при якій механічна потужність $P=M \times \omega$ на валу максимальна.

При зменшенні довжини хвилі від максимального проектного значення a_{max} до мінімального проектного значення a_{min} механізм регулювання довжини ГЕЕ збільшує його довжину (витравлює ГЕЕ) настільки, щоб механічна потужність P на валу була максимальною. Для цього в обчислювачі реалізується один з відомих алгоритмів пошуку екстремума, наприклад, метод послідовних наближень. Отриманий з виходу обчислювача сигнал керування через підсилювач подається на електропривод, який шляхом витравлювання/вибирання довжини ГЕЕ встановлює його оптимальну довжину L_{opt} . За допомогою гальма довжина ГЕЕ L_{opt} фіксується незмінною для хвилі, що впливає, з поточними параметрами, що дозволяє максимально ефективно перетворити енергію хвилі при зміні довжин хвиль у широких межах. За допомогою механізму регулювання довжини ГЕЕ при зміні довжини хвилі його крок стає рівним довжині хвилі, що забезпечує максимальну механічну потужність робочого органа. Регулювання довжини ГЕЕ дозволяє збільшити енергетичну ефективність ХЕС у широкому діапазоні зміни довжин хвиль $a_{max} > a > a_{min}$, тому що при зменшенні довжин хвиль, що впливають, вона не знижує крутний момент і, відповідно, не знижує механічну потужність на валу.

Розглянемо енергетичні аспекти функціонування ХЕС із ГЕЕ. При фіксованій довжині спіралі (довжини ГЕЕ) $L=const$ залежність діаметра d спірального ротора (а тоді і його крутного моменту M на валу) від довжини хвилі a може бути описана відношенням:

$$d = \frac{a\sqrt{L^2 - H^2}}{\pi H}, \quad (1.10)$$

де $H < L$ – ефективна довжина вала.

Очевидно, що при $H=const$ (конструктивна довжина вала, до якої прикладається крутний момент від ГЕЕ) енергетична ефективність такої ХЕС буде змінюватися пропорційно довжині хвилі a , тому що є пропорційна залежність між механічною потужністю, крутним моментом і діаметром d спірального ротора (плеча сили гідродинамічного напорі на одиницю довжини ГЕЕ), тобто $P \equiv M \equiv d \equiv a$. Наприклад, при зменшенні довжини хвилі в 2 рази діаметр спірального ротора такої ХЕС зменшується в 2 рази, що приводить до пропорційного зменшення крутного моменту й, отже, механічної потужності.

Механізм регулювання довжини ГЕЕ реалізує закон керування:

$$L_{opt}=f(P_{max}), \quad (1.11)$$

де $P_{max} = M \times \omega = f(L) \rightarrow \max$.

Енергетична ефективність такий ХЕС у порівнянні з базовим варіантом електростанції зі спіральним плаваючим ротором визначається коефіцієнтом $k \geq 1$:

$$k = a_{max}/a, \quad (1.12)$$

де $a_{max} > a > a_{min}$.

Таким чином, керована зміна довжини ГЕЕ у функції максимуму механічної потужності на валу в умовах нестаціонарності параметрів морських хвиль є одним з напрямків підвищення ефективності функціонування ХЕС. Воно забезпечує максимально ефективну гідродинамічну взаємодію ГЕЕ з вертикальною складовою морського хвилювання в розрахунковому діапазоні зміни його енергетичних характеристик (частоти й амплітуди морських хвиль).

Вивчення особливостей функціонування ХЕС із ГЕЕ дає підставу сформулювати також наступні додаткові завдання, спрямовані на підвищення їх енергетичної ефективності [43-46]:

автоматична просторова орієнтація платформи з ГЕЕ щодо вектора швидкості набігання хвиль, оскільки від цього залежить довжина ділянки хвилі, з якої знімається гідроенергія й, як наслідок поточні енергетичні показники ХЕС;

оптимальне регулювання поточного значення потужності, що знімається з ХЕС у процесі її роботи, оскільки це впливає на ефективність первинного енергетичного процесу електростанції – гідродинамічної взаємодії ГЕЕ й водного середовища як носія гідроенергії;

електрично послідовне включення синхронних генераторів ХЕС, що дає можливість без застосування підвищувальних трансформаторів підвищити вихідну напругу електростанції, забезпечивши таким шляхом зниження її масогабаритних розмірів і зменшення перетину підводного кабелю для передачі електроенергії до берегових споживачів.

Крім того, для забезпечення стійкості ХЕС до зовнішніх впливів необхідно вводити ще один контур адаптації – регулювання глибини занурення ГЕЕ з метою його розташування в зоні максимального розрахункового значення енергії хвилі. Зазначений контур одночасно забезпечує виробництво електроенергії із проектними параметрами в умовах підвищеного хвилювання моря й забезпечувати захист конструкції ХЕС від понад проектного силового впливу хвиль [30, 33].

Таким чином, підвищення енергетичної ефективності ХЕС прямо пов'язане з реалізацією нових принципів керуванням її гнучким енергопоглинаючим елементом, а також керуванням просторовим положенням ХЕС як твердого тіла в схвилюваному морському середовищі.

1.4 Коротка характеристика ХЕС із гнучким енергопоглинаючим елементом як об'єкта керування

Аналіз структури й принципів функціонування ХЕС із ГЕЕ дає можливість представити її як багатозв'язний багатоконтурний об'єкт керування. На рис. 1.15 склад устаткування ХЕС із чотирьохрівневим перетворенням енергії хвилі в електричну енергію [33].

Перший рівень перетворення енергії утворюють ГЕЕ, система важелів, закріплених на робочому валопроводі й сам валопровід. Зворотно-поступальний рух важелів за допомогою храповиків призводить до рівномірного одностороннього обертального руху валопровода.

Другий рівень перетворення енергії містить редуктор і гідротурбину, завдання якої при мінливих у часі вхідних параметрах і низькій частоті обертання валопровода забезпечити високу й стабільну частоту обертання синхронного генератора, чим досягається керування активної складової його потужності.

Третій рівень перетворення енергії містить синхронний генератор (СГ), який перетворює механічну енергію гідротурбіни в електричну енергію змінного струму. При цьому, автоматичний регулятор напруги СГ мінімізує реактивну складову потужності зміною струму збудження [47].

При подачі енергії в довгу підводну кабельну лінію виникає потреба в підвищенні напруги для забезпечення припустимих втрат. Тому вводять четвертий рівень перетворення енергії – трансформаторне підвищення напруги на виході ХЕС. Цей рівень перетворення суттєво збільшує масу й габаритні розміри ХЕС.

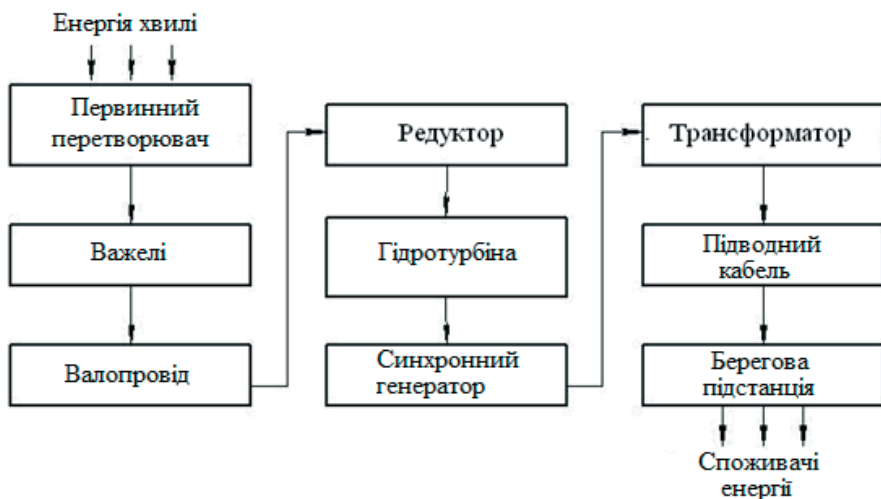


Рис. 1.15 – Склад обладнання ХЕС з чотирьохрівневим перетворенням енергії

Цей рівень перетворення суттєво збільшує масу й габаритні розміри ХЕС тому що установка потужності підвищувального трансформатора дорівнює потужності ХЕС у цілому. З метою без трансформаторного підвищення вихідної напруги ХЕС пропонується послідовне електричне з'єднання двох СГ, які приводяться в обертання різними приводними двигунами [48].

Розглянемо тепер структуру ХЕС як об'єкта автоматичного керування. Відповідно до описаного вище складу обладнання можна виділити п'ять контурів керування [44, 45]:

- перший контур керування виконує просторову орієнтацію ХЕС щодо вектора швидкості хвиль, що набігають, і глибини її занурення з метою розташування ГЕЕ в зоні максимального розрахункового значення енергії хвиль;
- другий контур здійснює керування гідродинамічною взаємодією ГЕЕ й водного середовища як носія гідроенергії (керування довжиною ГЕЕ з метою максимально ефективного перетворення в механічну енергію енергії вертикальної складової морського хвилювання в розрахунковому діапазоні зміни її енергетичних характеристик);;
- третій контур здійснює регулювання активної потужності й стабілізацію вихідної напруги ХЕС шляхом регулювання кута між роторами синхронних генераторів [49];
- четвертий контур здійснює автоматичне регулювання реактивної потужності ХЕС шляхом регулювання порушення СГ;
- п'ятий контур забезпечує роботу ХЕС зі споживачем (мережею нескінченної потужності, автономним навантаженням або системою акумулювання енергії) з метою недопущення механічного перевантаження ГЕЕ.

Узагальнена структура ХЕС як об'єкта керування дана на рис. 1.16.

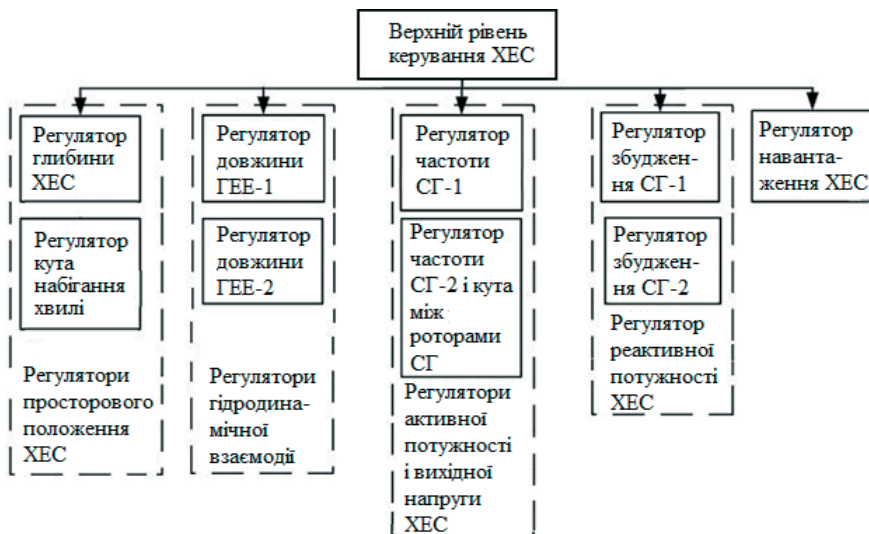


Рис. 1.16 – Узагальнена структура ХЕС як об'єкта керування

Для забезпечення роботи ХЕС необхідно паралельно керувати цими контурами.

У табл. 1.3 наведені пояснення, що стосуються автоматичного керування ХЕС.

Для автоматизації керування гідротурбіною у всьому робочому діапазоні частот можна скористатися всережимним регулятором швидкості, який керує голкою подачі робочої рідини [50].

Таблиця 1.3 – Критерії керування ХЕС із чотирма рівнями перетворення енергії й п'ятьма контурами керування

№ контуру	Параметр керування	Рівні перетворення енергії			
		Хвильова енергія – механічне обертання	Механіч. обертання – енергія робочого тіла	Енергія робочого тіла – електроенергія	Електроенергія – електроенергія
		Критерії			
1	2	3	4	5	6
1	Кут набігання хвилі	Макс. відбір енергії			
2	Глибина занурення	Конструктивна міцність, макс. відбір енергії			
3	Довжина ГЕЕ	Макс. відбір енергії			
4	Швидкість обертання гідротурбіни		Стабілізація кутової частоти обертання ротора СГ		
5	Кут між роторами СГ			Безтрансформаторне збільшення напруги ХЕС	
6	Збудження СГ				Регулювання реактивної енергії
7	Величина електрич. навантаження ХЕС				Стійка робота ХЕС при макс. енерговиробництві

На рис. 1.7 і в табл. 1.3 зазначені, по суті, основні складові узагальненої структури системи автоматичного керування (САК) ХЕС. Така структура містить п'ять контурів керування, кожний з яких складається з декількох регуляторів. Аналіз показує, що САК першим, четвертим і п'ятим контурами можуть бути побудовані на основі використання традиційних П-П- і ПД-

регуляторів і їх синтез не викликає теоретичних труднощів. Що ж стосується другого й третього контурів керування, то синтез їх регуляторів є складним і наукомістким завданням, тому що вимагає проведення попередніх теоретичних досліджень об'єктів керування.

Тому в подальшому будемо розглядати питання автоматичного керування саме цих контурів ХЕС.

Попередній аналіз можливих розв'язків САК довжиною ГЕЕ, швидкістю обертання гідротурбіни й кута між роторами СГ показує, що найбільш перспективні технічні рішення за критеріями якості керування можуть бути отримані тільки на основі застосування елементів штучного інтелекту (ШІ) [51-53]. Це обумовлене істотною нелінійністю ХЕС як об'єкта керування (гідродинамічна взаємодія елементів ХЕС і послідовне перетворення енергії хвиль в електроенергію), а також нестаціонарністю характеристик морських хвиль і необхідністю постійної адаптації параметрів ХЕС до їхньої зміни з метою максимального відбору потужності хвилі.

САК ХЕС на основі ШІ включає, крім інших тривіальних систем, систему автоматичного керування довжиною ГЕЕ й систему автоматичної стабілізації кутової частоти синхронних генераторів і кута між векторами їх напруг. Перша система покликана автоматично встановлювати довжину ГЕЕ такою, щоб переданий на робочий вал крутний момент був максимальним при зміні характеристик морських хвиль у заданому (проектному) діапазоні значень. Принципи її побудови й функціонування викладено в п.р. 1.3.

Друга система містить стабілізатор С1 кутової частоти обертання першого (опорного) СГ і стабілізатор С2 кутової частоти обертання другого (прохідного) СГ, який має додаткову функцію регулювання (стабілізації) кута між векторами напруг цих генераторів [54]. При цьому, статорні обмотки обох СГ включені послідовно, для чого в першого СГ обмотки включені «зіркою», а в другого СГ обмотки розділені й включені послідовно з обмотками першого СГ (рис. 1.17).

Система автоматичного керування містить стабілізатор С1 кутової частоти обертання гідротурбіни ГТ1 першого генератора СГ1 (стабілізація частоти генеруємої напруги змінного струму $f \rightarrow f_{\text{зад}}$) і стабілізатор кута між векторами напруг U_1 і U_2 синхронних генераторів СГ1 і СГ2. Оскільки об'єктом керування є гідротурбіни ГТ1 і ГТ2, розглянемо особливості керування ними на прикладі механогідравлічної системи ХЕС, структурна схема якої наведена на рис. 1.18.

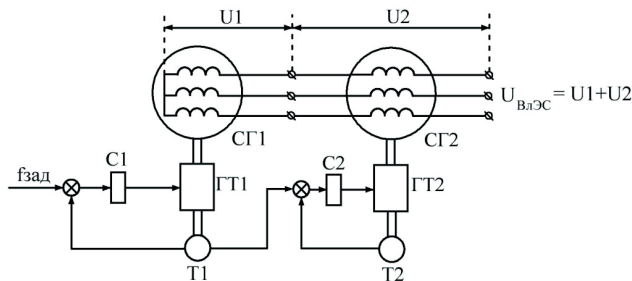


Рис. 1.17 – Послідовне включення синхронних генераторів ХЕС

У якості регульованих елементів представлені: ГЕЕ й гідротурбіна (ГТ). На схемі показані також датчики потужності й положення плавучої платформи Т1, датчик швидкості обертання Т2.

При достатній енергії хвилі ГЕЕ через систему важелів і редуктор (Р) приводить в обертний рух робочий вал і гідронасос (ГН).

Гідронасос створює необхідні тиск $P1$ і напір $q1$ у гідроаккумуляторі (ГА). Гідравлічна енергія ГА з параметрами $\{P2, q2\}$ уводить у роботу ГТ, яка обертає вал СГ. Датчик Т2, встановлений у зворотному зв'язку, сформованому на виході системи, визначає частоту обертання ГТ $\omega_{ГТ}$. Далі, значення $\omega_{ГТ}$ порівнюється із заданим і, якщо воно не відповідає йому, САК впливає на голку (Г) подачі робочої рідини в ГТ, яка, відповідно, регулює параметри $\{P3, q3\}$ робочої рідини для ГТ.

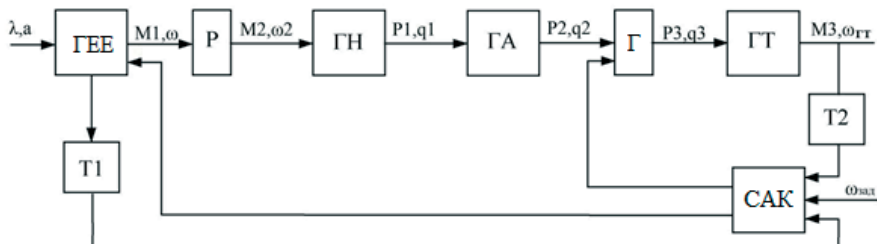


Рис. 1.18 – Структурна схема механогідравлічної системи ХЕС

Система керування ГЕЕ й ГТ будується на основі ПІД-регулятора, на входи якого подаються сигнал, що задає, і сигнал з датчика регульованого параметра. ПІД-регулятор формує керуючий сигнал для перетворювача частоти, який за рахунок зміни швидкості обертання привода підтримує керовану величину рівною заданій.

Точність і стійкість системи регулювання, а також вид перехідних процесів визначаються структурою й параметрами ПІД-регулятора. Правильність його налаштування впливає на ефективність і якість роботи всієї системи й визначає економічний ефект. Налаштування регулятора здійснюється

програмно й залежить від реальних фізичних параметрів: від конфігурації трубопроводів, а також вимог, пропонованих споживачем до системи керування.

До автоматичних систем регулювання пред'являються вимоги не тільки по стійкості процесів регулювання у всьому діапазоні навантажень на об'єкт, але й по забезпеченню певних якісних показників процесу автоматичного регулювання. Ними є:

- помилка регулювання (статистична або середньоквадратична складові);
- час регулювання;
- перерегулювання;
- показник коливальності.

Виконаний вище аналіз особливостей роботи ХЕС показує, що вони працюють в умовах істотної невизначеності величини навантаження й тенденція енергії хвилі, обумовленої режимами експлуатації. Для них також характерним є значний діапазон східчастої зміни (скидання й наброса) навантаження, більш широкій у порівнянні з навантаженнями електроенергетичної мережі (до 60-80 %).

Крім того, для ХЕС характерними є більш жорсткі вимоги до рівня автоматизації й до якості електроенергії, особливо до стабілізації частоти й напруги в перехідних режимах. Так, САК ХЕС повинна забезпечувати в режимі, що встановився, стабілізацію частоти електромережі з точністю не гірше $\pm 0,3$ % від номінальної частоти при зміні навантаження від холостого ходу до 110 % номінальної, а також забезпечувати повернення частоти в зазначені межі при скиданнях і накиданнях 50-100 % навантаження не більш ніж за 2-3 секунди відповідно; забезпечувати стабілізацію напруги мережі в межах 5 % від номінального в режимах, що встановилися, і в межах 10 % у перехідних режимах.

Для успішного вирішення поставленого завдання необхідно вирішити ряд наступних теоретичних і експериментальних задач:

- розробка математичної моделі (ММ) хвилі як джерела енергії;
- розробка ММ енергопоглинаючого елемента ХЕС (квазістаціонарний і динамічно режими);
- розробка ММ елементів перетворення параметрів енергії ХЕС (гідравліка, електромеханіка);
- розробка моделюючого комплексу (комп'ютерні моделі) для дослідження ефективності САК ХЕС;
- верифікація роботи моделюючого комплексу;
- синтез і дослідження ефективності роботи систем автоматичного регулювання синхронного генератора, система регулювання довжини ГЕЕ на основі використання нейромережевих моделей об'єктів керування.

Запитання для самоаналізу

1. Які основні принципи перетворення енергії хвиль?
2. Які перетворювачі застосовуються для поверхневих хвиль?
3. Які перетворювачі застосовуються для глибинних хвиль?

4. Від чого залежить потужність, що знімається з поверхневих хвиль?
5. Які особливості структури ХЕС із гнучкими енергопоглинаючими елементами?
6. Яким чином у ХЕС із гнучкими енергопоглинаючими елементами компенсується зміна параметрів хвиль?
7. Які перетворювачі енергії застосовуються в ХЕС із гнучкими енергопоглинаючими елементами?
8. Що входить до складу ХЕС із гнучкими енергопоглинаючими елементами?
9. Назвіть критерії керування ХЕС.
10. Які елементи ХЕС є об'єктами автоматизації?

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОГО Й АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ХВИЛЬОВОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

2.1 Постановка задачі

Попередній аналіз ХЕС як об'єкта керування показує, що умови її функціонування характеризуються невизначеністю зовнішніх збурень і широким діапазоном зміни експлуатаційних режимів. Очевидно, найбільш перспективним напрямком створення ефективних систем автоматичного керування (САК) такими об'єктами є синтез адаптивних, самонастроювальних регуляторів і систем керування на їхній основі, а також синтез САК на основі нечітких регуляторів і інверсних моделей об'єкта керування [55-58]. Для синтезу й дослідження САК енергетичними об'єктами сучасна наука використовує широкий діапазон засобів, серед яких найбільше поширення одержали класичні аналітичні методи [59-60] і методи математичного моделювання [61].

Однак, практика керування морськими об'єктами показує, що застосування класичних методів синтезу САК ускладнене внаслідок неповноти інформаційного забезпечення системи керування внаслідок багатомірності й багатозв'язності об'єкта керування (ОК), стохастичної природи морських хвиль, суттєво нелінійного математичного опису моделі ОК.

У зв'язку із цим як основний метод дослідження прийнятий метод математичного моделювання, який реалізований за допомогою пакета Simulink програмного середовища MATLAB [62].

Для вирішення головної задачі дослідження – синтезу вискоєфективних регуляторів основних робочих режимів ХЕС із властивостями адаптації до характеристик морських хвиль – необхідно створити математичні моделі об'єктів керування: системи керованої зміни довжини гнучкого енергопоглинаючого елемента (ГЕЕ); гідравлічної системи ХЕС; синхронних генераторів і берегово-

го навантаження; створити програмне забезпечення для синтезу нейронечітких регуляторів.

У результаті повинен бути створений спеціалізований моделюючий комплекс, що дозволяє перевіряти ефективність синтезованих регуляторів ХЕС методом комп'ютерного моделювання. При цьому, достовірність роботи цього комплексу повинна бути підтверджена експериментальним шляхом.

Іншою задачею розділу є експериментальна перевірка працездатності самого принципу функціонування ХЕС із ГЕЕ на фізичному аналозі – макеті ГЕЕ й перевірка достовірності створеного спеціалізованого моделюючого комплексу ХЕС шляхом порівняння результатів комп'ютерного моделювання роботи макета ГЕЕ з експериментальними даними.

З метою одержання найбільш достовірного наукового результату експериментальна перевірка ГЕЕ ХЕС виконувалася в дослідницькому басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

У якості об'єкта дослідження в дисертації розглядається ХЕС, що містить два енергетичні модулі, кожний з яких виконаний на окремій платформі й містить ГЕЕ, трансмісію (Тр) у складі робочого вала й підвищувального редуктора, низькообертовий гідронасос високого тиску (ГН), гідроакумулятор (ГА), приводну гідротурбіну (ГТ), синхронний генератор (СГ), а також систему автоматичного керування (САК) зазначеним обладнанням.

У кожному модулі енергія хвилі через ГЕЕ впливає на трансмісію й приводить в обертання ГН, що нагнітає робочу рідину в ГА. Енергія робочої рідини ГА забезпечує роботу ГТ, що й перебуває на її валу СГ.

З метою зниження перетину підводного кабелю, за допомогою якого вироблювана ХЕС електроенергія передається в берегове навантаження, синхронні генератори енергомодулів з'єднані між собою електрично послідовно (див. рис. 1.17), що при автоматичному керуванні кутами повороту їх роторів забезпечує додавання векторів їх напруг i , таким чином, реалізує безтрансформаторне підвищення вихідної напруги ХЕС.

Крім того, кожна платформа енергомодуля має можливість занурення й повороту щодо вектора швидкості хвиль, що набігають, для зниження нерозрахованих хвильових навантажень і максимального знімання гідроенергії ГЕЕ.

2.2 Розробка й обґрунтування структури спеціалізованого моделюючого комплексу для дослідження ефективності САК ХЕС

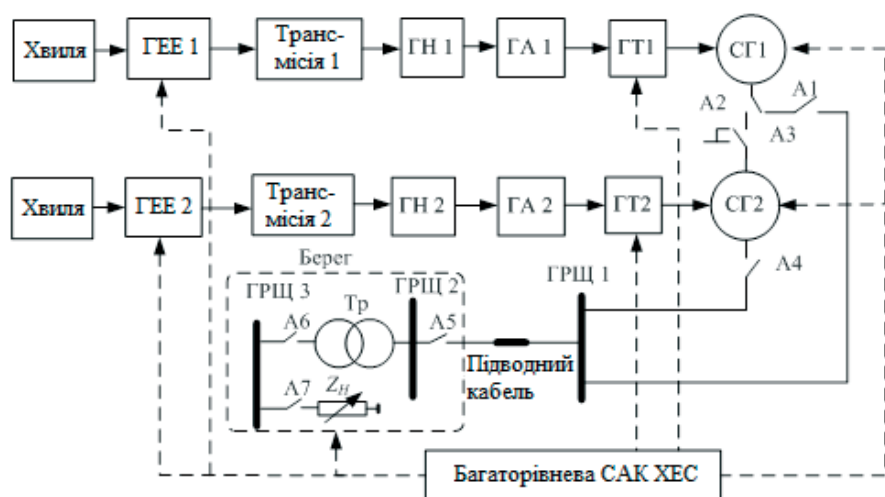
Структурно спеціалізований моделюючий комплекс (СМК) містить у собі математичні моделі окремих енергоперетворюючих елементів ХЕС (ГЕЕ, трансмісії, ГН, ГА, ГТ і СГ) і математичні моделі релейно-захисної апаратури й штатних систем автоматики, що забезпечують спільну роботу структурних елементів станції відповідно до поточного режиму її роботи. Структурна схема такой ХЕС показана на рис. 2.1,а.

Крутні моменти ГТ передаються на вал відповідних синхронних генераторів (СГ), статорні обмотки яких включені послідовно. Таким чином, на виході ХЕС у складі двох енергомодулів генерується подвійна напруга $\vec{U}_E = \vec{U}_1 + \vec{U}_2$, сформована безтрансформаторним шляхом.

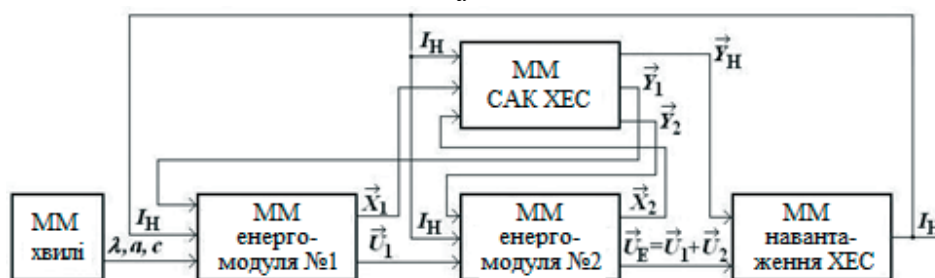
Відповідно, структура спеціалізованого моделюючого комплексу (СМК) ХЕС із двома енергетичними модулями буде мати вигляд, показаний на рис. 2.1,б, де позначене: \vec{U}_1, \vec{U}_2 – вектори напруг СГ1 і СГ2; I_H – струм навантаження ХЕС; Y_H, Y_1, Y_2 – відповідно, множини керуючих впливів для навантаження й енергетичних модулів ХЕС; X_1, X_2 – відповідно, множини сигналів зворотних зв'язків енергомодулів ХЕС.

У свою чергу, вектори керуючих впливів і зворотних зв'язків містять наступні складові:

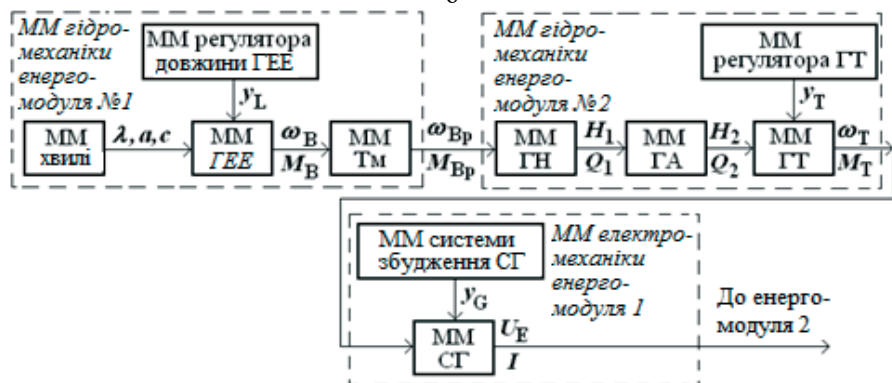
$$\begin{aligned} Y_H &= \{yr\}; \quad Y_1 = \{yl_1; yg_1; yt_1\}; \\ Y_2 &= \{yl_2; yg_2; yt_2; ye\}; \\ X_1 &= \{xl_1; x_{M1}; x\omega_1; xu_1\}; \\ X_2 &= \{xl_2; x_{M2}; x\omega_2; xu_2; x_E\}, \end{aligned} \tag{2.1}$$



а



б



в

Рис. 2.1 – Структура ХЕС з ГЕЕ і структура СМК для дослідження ХЕС

де u_r – сигнал завдання величини електричного навантаження ХЕС (електричного опору навантаження); u_l, u_g, u_t – відповідно, сигнали, що керують, на зміну довжини ГЕЕ, напруги збудження й положення регулювальної голки гідротурбіни; u_e – керуючий сигнал-датчик величини вихідної напруги ХЕС; x_l, x_m, x_ω, x_i – відповідно, сигнали від сенсорів довжини витравленої частини ГЕЕ, моменту й кутової частоти обертання ГМ, напруги СГ; x_e – сигнал від сенсора вихідної напруги ХЕС; «1», «2» – індекси приналежності змінних до першого й другого енергомодулів.

У роботі досліджуються вплив довжини ГЕЕ на енергоефективність ХЕС і питання забезпечення стійкої послідовної роботи СГ. Систему автоматичного керування іншими режимами роботи (зміна глибини занурення ХЕС і кута зустрічі із хвилею, регулювання електричного навантаження) не розглядаємо.

У зв'язку із цим математична модель енергомодуля 1 як складова СМК ХЕС має вигляд, показаний на рис. 2.1,в, де позначене: $\omega_{в,вр,т}$, $M_{в,вр,т}$ – кутова частота обертання й момент на валу відповідного перетворювача енергії; $H_{1,2}$, $Q_{1,2}$ – напір і витрата ГН і ГА.

Математична модель енергомодуля 2 будується по такому ж принципу. Відмінність полягає лише в моделюванні послідовного включення статорної обмотки СГ2 зі статорною обмоткою СГ1 і моделюванні регулятора ГТ2, який забезпечує стійку послідовну роботу СГ. Зазначені особливості описані нижче.

2.3 Розробка математичних моделей елементів ХЕС

Структурно математична модель ХЕС містить у собі математичні моделі окремих елементів (хвиля, ГЕЕ, трансмісія, ГС, ГТ, СГ, берегові навантаження) і математичні моделі релейно-захисної апаратури, що забезпечує спільну роботу структурних елементів станції відповідно до поточного режиму її роботи.

Нижче приводяться математичні моделі основних елементів ХЕС як об'єктів керування – ГЕЕ, ГТ, СГ і їх регуляторів – автоматичного регулятора довжини ГЕЕ, частоти обертання ГТ та збудження СГ (АРЗ). Крім того, як невід'

ємні компоненти в ланцюзі перетворення енергії розглядаються математичні моделі трансмісії Тр, гідронасоса ГН і акумулятора А.

2.3.1 Розробка математично моделі хвилі як джерела енергії. Хвильовим рухом рідини, що перебуває під дією сили ваги, що й має вільну поверхню, називається рух, при якому піднесення вільної поверхні над деякою обраною фіксованою горизонтальною площиною змінюється [63].

У напрямку руху фронту хвилі хвильовий рух є двовірним. Його можна представити у вигляді руху рідини між двома вертикальними площинами, розташованими на одиничній відстані друг від друга (рис. 2.2).

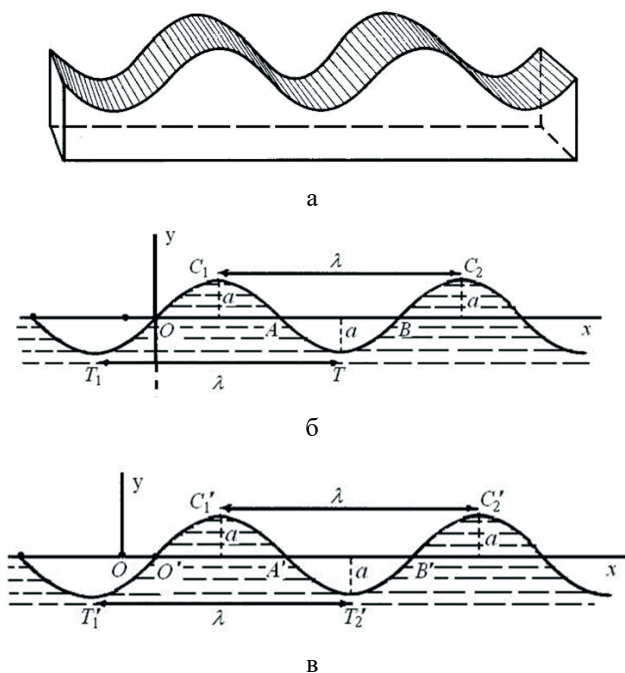


Рис. 2.2 – Спрощена схема хвильового руху

У координатах x - y , де вісь x спрямована горизонтально уздовж руху фронту хвилі, а вісь y – вертикально нагору, рівняння вертикального переріза вільної поверхні в момент часу t можна представити у вигляді [9]:

$$Y = A \sin(mx - nt), \quad (2.2)$$

де A , m , n – постійні величини.

Хвиля, яка має форму, зображену на рис.2.2, називається простою прогресивною гармонійною хвилею. Точки C_1 , C_2 – максимальні піднесення вільної поверхні (гребені). Точки T_1 , T_2 – максимальні зниження вільної поверхні (западини).

Профіль вільної поверхні прогресивної гармонійної хвилі в моменти часу $t=0$ і $t>0$ показаний на рис. 2.2,б і 2.2.в.

Хвиля рухається в позитивному напрямку осі x зі швидкістю $c=n/m$, а форма вільної поверхні однакова як у момент часу t , так і в момент часу $(t + \frac{2\pi}{n})$.

Звідси довжина хвилі визначається як

$$\lambda = \frac{2\pi}{m}, \quad (2.3)$$

а період хвилі як

$$\tau = \frac{2\pi}{n}. \quad (2.4)$$

Величина, зворотна періоду, називається частотою й позначається у вигляді $f = n / 2\pi$. Кут $(mx - nt)$ називають фазовим кутом, а число n – фазовою швидкістю. Довжина, період і швидкість поширення хвилі пов'язані співвідношенням $\lambda = c\tau$.

Таким чином, рівняння профілю хвилі може бути презентовано у вигляді виразу

$$y = A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct). \quad (2.5)$$

Згідно [9], швидкість руху хвилі по глибині, виражена через довжину хвилі $\lambda = \frac{2\pi}{m}$, задається формулою у вигляді

$$\frac{c^2}{gh_g} = \frac{\lambda}{2\pi h_g} \operatorname{th}\left(\frac{2\pi h_g}{\lambda}\right), \quad (2.6)$$

де h_g – глибина руху хвилі.

У цьому виразі при малих величинах λ/h_g відношення $2\pi h_g/\lambda$ велике й, отже, ліва частина виразу приблизно рівна $c^2/gh_g = \lambda/2\pi h_g$, тому що $\operatorname{th}(2\pi h_g/\lambda) \rightarrow 0$ при $(2\pi h_g/\lambda) \rightarrow \infty$.

Таким чином, для малих значень λ/h_g швидкість c пропорційна $\sqrt{\lambda}$. З іншого боку, якщо відношення λ/h_g велике, то відношення h_g/λ мале і, отже, приблизно $c^2 = gh_g$.

Таким чином, швидкість руху хвилі по глибині прагне до постійного значення $\sqrt{gh_g}$, яке вона не може перевищити. Ці результати зображені на рис. 2.3.

Звідси випливає висновок, що умові $c < \sqrt{gh_g}$ відповідає тільки одна довжина хвилі, величина якої є шуканою швидкістю руху хвилі на глибині.

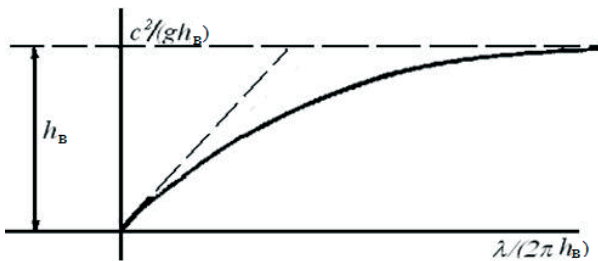


Рис. 2.3 – Взаємозв'язок величини швидкості поширення від довжини хвилі за глибиною

Швидкість руху хвилі на поверхні, згідно [9], визначається по формулі

$$c^2 = \frac{g}{m} = \frac{g\lambda}{2\pi}, \quad (2.7)$$

Звідки випливає висновок, що швидкість руху хвилі на поверхні пропорційна квадратному кореню з її довжини.

Швидкість руху хвилі залежить не тільки від довжини хвилі, але також і від амплітуди. Величину швидкості руху хвилі слід розраховувати по формулі [9]

$$c^2 = \frac{g}{m} (1 - A^2 m^2)^{-1} = \frac{g}{m} (1 + A^2 m^2). \quad (2.8)$$

Рівняння (2.6) дає можливість визначити глибину необхідного занурення ГЕЕ щодо незбуреної поверхні. Підставою для цього є виконання умови, при якому радіус обертання часток у хвилі збігається з радіусом обертання енергопоглинаючого елемента.

При цьому

$$R = A e^{mh}. \quad (2.9)$$

Звідки

$$h_g = \frac{\lambda}{2\pi} \ln \frac{R}{A}. \quad (2.10)$$

Швидкість хвилі не є швидкістю часток рідини, які при хвильовому русі на поверхні каналу кінцевої глибини рухаються по еліптичних траєкторіях, а в рідині нескінченної глибини по кругових.

Слід помітити також, що всі частки, розташовані під гребенем або западиною, рухаються горизонтально на тій же вертикальній лінії. Зокрема, частка, що перебуває на гребені, рухається вперед у найвищу точку кола (еліпса), у той час як у западині вона рухається у зворотному напрямку в саму нижчу точку кола (еліпса).

2.3.2. Розробка математично моделі енергопоглинаючого елемента ГЕЕ гнучкого типу. Морське хвилювання має досить складний математичний опис, що враховує в тому числі й нерівномірність розподілу вертикальної швидкості

руху водних мас по глибині. Але в даній роботі при моделюванні хвилі ці особливості переміщення водних мас не враховуються, оскільки ХЕС і її ГЕЕ розташовуються поблизу поверхні моря.

У якості основного закону, що описує рух водних мас при виникненні хвилювання, будемо використовувати відому залежність:

$$y_h = A \sin\left(\frac{n}{c}(x - ct)\right) + h, \quad (2.11)$$

де y_h – положення частки по вертикалі при наявності хвилювання;

h – положення частки води по вертикалі (осі ординат) при відсутності хвилювання, розглянутий об'їм водної товщі (якщо $h = 0$, то частка належить поверхні хвилі); x – положення частки по горизонталі;

A – амплітуда хвилі; n – частота хвилі; c – швидкість поширення хвилі,

t – час моделювання.

Якщо хвиля має складну форму, то її можна представити сумою гармонік (2.11) з різними параметрами A , n , c .

Безпосередньо на ГЕЕ, виходячи із законів гідродинаміки, впливають швидкості вертикальних переміщень часток води V_w , які з рівняння (2.11) знайти нескладно:

$$V_w = dy/dt. \quad (2.12)$$

З урахуванням допущення про рівномірний розподіл вертикальних швидкостей руху води величина V_w буде однаковою для всіх об'ївів h .

У даній роботі прийняте, що ГЕЕ являє собою гнучку стрічку нульової плавучості. Математичне моделювання гнучких тіл у водному середовищі є найскладнішим завданням гідродинаміки, яке частково вирішено у відомих роботах [64-66] в основному для кабель-тросів. Відомості про математичне моделювання гнучких стрічок у потоці води в науковій літературі відсутні. Крім того, дана постановка задачі ускладнюється тим, що рух гнучкого тіла (стрічки)

відбувається в постійно мінливому по амплітуді водному потоці по всій її довжині [67].

Позначимо довжину витравленої частини стрічки L , її ширину w і товщину b . Тоді масу стрічки знайдемо по формулі

$$m = Lwb\rho, \quad (2.13)$$

де ρ – питома щільність води.

Оскільки на стрічку справляють дію тільки вертикальна переміщення водних мас, то її зручно представляти у вигляді сукупності точок, які з'єднані відрізками й кожна з яких може переміщатися тільки по вертикалі. Така вистава дуже зручна, оскільки важелі, які з'єднують ГЕЕ і вал ХЕС також можуть рухатися тільки по вертикалі. Проекції кожного відрізка на горизонтальну вісь (вісь абсцис) приймемо рівними. Рух точок стрічки будемо розглядати як рух матеріальних тіл у потоці води. Таким чином, стрічка представлена в потоці води як сукупність елементарних тіл, рух яких у водній товщі підкоряється класичним законам гідродинаміки й кінематики [68, 69].

Загальна довжина стрічки буде визначатися по формулі

$$L_{\text{л}} = \sum_{n=1}^{N-1} \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2}, \quad (2.14)$$

де N – кількість елементарних частин, якими представлена стрічка; y_n і x_n – координати центрів елементарних частин стрічки, при цьому $x_{n+1} - x_n = \text{const}$.

Якщо $L_{\text{л}} > L$, то стрічка перебуває в натягнутому стані й кожна елементарна частина стрічки буде піддана дії сили натягу відповідно до закону Гука [48]:

$$\Delta L = L_{\text{л}} - L; \quad (2.15)$$

$$F_{\text{н}} = -k \Delta L; \quad (2.16)$$

$$F_{\text{нн}} = 0,5 (ly |F_{\text{н}}| + ry |F_{\text{н}}|), \quad (2.17)$$

де ΔL – подовження стрічки;

F_n – модуль сили натягу, що діє на стрічку;

k – коефіцієнт пружності стрічки;

F_{nn} – модуль сили натягу, що діє на елементарну частину стрічки;

l_y, r_y – ординати одиничних векторів сил натягу, що діють на елементарну частину стрічки. Величини l_y, r_y характеризують ступінь впливу сили натягу на n -у частину стрічки відповідно ліворуч і праворуч і визначаються по формулах

$$l_y = \frac{y_{n-1} - y_n}{\sqrt{(x_{n-1} - x_n)^2 + (y_{n-1} - y_n)^2}}; \quad (2.18)$$

$$r_y = \frac{y_{n+1} - y_n}{\sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2}}. \quad (2.19)$$

Формули (2.15-2.19) визначають взаємодію між елементарними частинами стрічки й забезпечують моделювання стрічки як єдиного тіла із гнучкими властивостями. У даній роботі згинна жорсткість стрічки не враховується, оскільки не передбачаються її надмірні перегини.

Головним фактором, який приводить частини стрічки в рух, є гідродинамічна сила F_T , яка виникає в результаті руху водних мас із вертикальною швидкістю V_w . Для кожного значення x величина V_w буде різною.

Оскільки стрічка представлена елементарними тілами, то й вплив гідродинамічних сил на неї будемо розглядати окремо на кожну її частину за відомим законом гідродинаміки [68]:

$$F_{zn} = 0,5\rho(V_{wn} - V_{zn}) |V_{wn} - V_{zn}| c_{zn} S_{zn}, \quad (2.20)$$

де F_{zn} – гідродинамічна сила, що діє на n -у елементарну частину стрічки;

V_{wn} – швидкість руху водних мас у районі n -ї елементарної частини стрічки;

V_{zn} – власна швидкість руху n -ї елементарної частини стрічки;

$c_{\text{дл}}$ і $S_{\text{дл}}$ – відповідно гідродинамічний коефіцієнт і характерна площа n -ї елементарної частини стрічки.

Якщо частина стрічки перебуває над водною поверхнею, то на неї буде діяти сила ваги:

$$F_{\text{мн}} = m_n g, \quad (2.21)$$

де m_n – маса елементарної частини стрічки; g – прискорення вільного падіння.

Величину m_n можна знайти з рівняння

$$m_n = m / N. \quad (2.22)$$

де N – кількість частин, якими представлена стрічка.

Об'єднавши рівняння (2.20) і (2.21), одержимо вираз для зовнішньої сили $F_{\text{вн}}$, яка діє на елементарну частину стрічки:

$$F_{\text{вн}} = \begin{cases} F_{\text{тн}}, & \text{при } y_n > y_0; \\ F_{\text{тн}}, & \text{при } y_n \leq y_0, \end{cases} \quad (2.23)$$

де y_n – ордината n -ої елементарної частини стрічки;

y_0 – ордината поверхні хвилі в n -ій точці (в горизонті $h = 0$).

Рівнодіюча сил, які діють на кожен елементарну частину стрічки, визначається по формулі

$$F_n = F_{\text{мн}} + F_{\text{вн}}. \quad (2.24)$$

Кінематичні параметри кожної елементарної частини стрічки знайдемо по таких формулах:

$$\left. \begin{aligned} a_n &= F_n / m_n; \\ V_{\text{дл}} &= \int a_n dt + V_{\text{дл}0}; \\ y_n &= \int V_{\text{дл}} dt + y_{n0}, \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

де a_n – прискорення елементарної частини стрічки;

V_{n0} і y_{n0} – відповідно початкові значення швидкості й положення n -ої елементарної частини стрічки, ці величини, як правило, дорівнюють нулю.

Вирази (2.11-2.13) описують рух водних мас при хвилюванні моря, вирази (2.14-2.25) утворюють математичну модель ГЕЕ (гнучкої стрічки) як систему з певного кількості елементарних частин, на які діють як зовнішні (гідродинамічні), так і внутрішні (натягу) сили.

Чим більшою кількістю точок N представлена стрічка, тим точніше модель представляє реальний ГЕЕ. Результати серії комп'ютерних експериментів показали, що при більших значеннях величини N необхідно зменшувати крок інтегрування dt для забезпечення коректних результатів, інакше частини стрічки не будуть устигати реагувати на виникнення сил натягу. Такі зміни приводять до істотного зростання комп'ютерних ресурсів, затрачених на моделювання. Виконати моделювання з достатньою точністю при порівняно невеликих витратах ресурсів комп'ютера можна, якщо кожна елементарна частина стрічки буде становити $0,5 \div 2,0$ % від загальної її довжини при кроці інтегрування $dt = 0,5 \div 1,0$ мс.

2.3.3. Математичне моделювання взаємодії енергопоглинаючого елемента з обертовим механізмом хвильової електростанції й гідроакумулятором. Обертовий механізм хвильової електростанції являє собою вал, який розташовується перпендикулярно руху хвилі. Його рух описується рівнянням

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{л}} - M_{\text{а}}, \quad (2.26)$$

де J – момент інерції вала;

ω – кутова швидкість обертання вала;

$M_{\text{л}}$ – момент, створюваний на валу під впливом ГЕЕ;

$M_{\text{а}}$ – протидіючий момент, створюваний на валу ГН.

Величина J для вала із круговим перетином обчислюється по формулі

$$J = 0,5\pi r^4 \rho_{\text{в}} L_{\text{в}} k_{\text{в}}, \quad (2.27)$$

де r – радіус вала; $\rho_{\text{в}}$ – щільність матеріалу, з якого виготовлений вал;
 $L_{\text{в}}$ – довжина вала; $k_{\text{в}}$ – коефіцієнт поправки, що враховує вплив приєднаних мас води й інших елементів конструкції, що брав участь в обертovому русі.

Як основу моделювання акумулятора енергії будемо використовувати відому залежність між потенційною енергією пружного тіла $E_{\text{а}}$ й мірою його деформації $x_{\text{а}}$, які пов'язані коефіцієнтом жорсткості $k_{\text{а}}$:

$$E_{\text{а}} = 0,5k_{\text{а}}x_{\text{а}}^2. \quad (2.28)$$

Цієї залежності з певним ступенем точності підкоряється й модель гідроакумулятора, використовувана в даній роботі. Виходячи із цього величина $M_{\text{а}}$ буде визначатися по формулі

$$M_{\text{а}} = -k_{\text{а}} \int \omega dt + M_{\text{а}0}, \quad (2.29)$$

де $M_{\text{а}0}$ – початкове значення моменту, створюваного на валу гідроакумулятором, яке, як правило, дорівнює нулю.

У даній формулі величина $k_{\text{а}}$ враховує всі конструктивні особливості гідроакумулятора, у тому числі й наявність редуктора між ним і валом. Моделювати споживання енергії нескладно, досить об'єднати вирази (2.29) і (2.30) і в кожний момент часу віднімати з $E_{\text{а}}$ певну величину.

Оскільки елементарні частини ГЕЕ роблять поступальний рух, а вал обертальне, то приведемо рух вала до ГЕЕ для того, щоб розглядати їх спільно. При порівняно великій довжині важеля й невеликій амплітуді поступальних переміщень частин ГЕЕ з певним наближенням справедливі такі залежності:

$$m_{\text{в}} \frac{dV_{\text{в}}}{dt} = F_{\text{л}} + F_{\text{а}}; m_{\text{в}} = \frac{J}{l^2}; V_{\text{в}} = \omega_{\text{в}} l; F_{\text{л}} = \frac{M_{\text{л}}}{l}; F_{\text{а}} = \frac{M_{\text{а}}}{l}; \quad (2.30)$$

де m_b – масовий еквівалент моменту інерції вала на кінці важеля;

V_b – поступальний еквівалент швидкості обертання вала на кінці важеля;

F_d – сила, яка виникає на валу внаслідок впливу ГЕЕ;

F_a – сила, яка виникає на кінці важеля під впливом акумулятора енергії; l – довжина важеля (плече).

Конструктивно вал закріплений на рамі ХЕС за допомогою храпових механізмів і може обертатися тільки в одну сторону, тобто завжди виконується умова $\omega \geq 0$. Крім того, кожний важіль, який з'єднає ГЕЕ елемент із валом, також закріплений на валу за допомогою храпового механізму. Через цю взаємодію вала й ГЕЕ ускладнюється й описується виразами, що містять певні умови:

- у кожний момент часу на вал можуть діяти тільки ті n -е частини стрічки, швидкість яких перевищує швидкість вала: $V_{ли} > V_b$;

- якщо такі частини стрічки є, то їх швидкості й швидкість вала зрівнюються відповідно до закону збереження імпульсу при непружному зіткненні тіл:

$$\left. \begin{aligned} V_c &= \frac{m_n}{m_c} \sum V_{ли}; \\ m_c &= m_b + \sum m_n, \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

де V_c – нова швидкість системи взаємодіючих тіл – вала й елементарних частин стрічки, задіяних у русі;

m_c – маса задіяних у русі тел.

Під знаками сум коштують ті n -і значення швидкостей і мас, для яких виконується умова $V_{ли} > V_b$;

- якщо після застосування закону збереження імпульсу виявляються такі частини стрічки, для яких справедлива умова $V_c > V_{ли}$, то ці частини виключаються з переліку задіяних у спільному русі тіл і величина V_c розраховується заново доти, поки не будуть виключені всі такі частини стрічки.

Після того, як виконаний розрахунок нових швидкостей частин системи взаємодіючих тіл, розраховуються їхні прискорення на цьому ж кроці. Для цьо-

го знаходимо величину $F_{\text{л}}$ як суму гідродинамічних і натягу сил, які діють на кожну задіяну в русі системи частина стрічки:

$$F_{\text{л}} = \sum F_n. \quad (2.32)$$

Далі знаходимо прискорення всієї системи:

$$\frac{dV_{\text{лн}}}{dt} = \frac{dV_{\text{в}}}{dt} = \frac{1}{m_{\text{с}}} (F_{\text{л}} + F_{\text{а}}). \quad (2.33)$$

Тоді на кожну частину стрічки буде діяти сила опору, обумовлена впливом ГН і ГА:

$$F_{\text{ан}} = m_n \frac{dV_{\text{лн}}}{dt} - F_{\text{лн}}. \quad (2.34)$$

Жодна з $F_{\text{ан}}$ не може бути більше нуля, оскільки сила опору гідроаккумулятора не може захоплювати частину стрічки в позитивному напрямку осі ординат. Тому починаючи з найбільшої позитивної $F_{\text{ан}}$ слід виключати ці частини стрічки із системи взаємодії з валом, щораз розраховуючи нове прискорення системи (2.33) і нові сили опору гідроаккумулятора, що діють на кожну частину стрічки (2.34).

Сукупність рівнянь (2.11) – (2.34) утворює механічну частину математичної моделі ХЕС – «хвиля – ГЕЕ – гідроаккумулятора», яка була реалізована в спеціалізованому програмному забезпеченні Waveenergy_v1.0, призначеному для дослідження роботи ХЕС такого типу як об'єкта керування.

На рис. 2.4 показаний фрагмент моделювання роботи механічної частини ХЕС при амплітуді хвилі 0,5 м, частоті хвилі 5 рад/с, швидкості хвилі 2 м/с, довжині ГЕЕ 11,1 м, ширині ГЕЕ 0,1 м, при цьому за 60 секунд моделювання гідроаккумулятор накопичує енергію 338 Дж.



Рис. 2.4 – Скріншот зображення ГЕЕ з програми WaveEnergy_v1.0

Отримані результати дозволяють рекомендувати запропоновану математичну модель як первинний інструмент для комп'ютерного моделювання ХЕС при вирішенні задач синтезу й оцінки ефективності систем автоматичного керування ХЕС.

2.3.4 Математичне моделювання редуктора. Редуктор – це зубчастий механізм, призначений для збільшення кутової швидкості вихідного вала стосовно вхідного. Відношення кутової швидкості на вході ω_1 до кутової швидкості на виході ω_2 називають передатним відношенням редуктора [70]:

$$u_{12} = \omega_1 / \omega_2 = n_1 / n_2 . \quad (2.35)$$

2.3.5 Математичне моделювання гідравліки.

2.3.5.1 Математична модель гідронасоса (ГН). Гідронасос має перспективною ланкою в системі гідравліки. За допомогою його, механічні енергії хвилі перетворює в енергії робочої рідини, які забезпечує роботи гідротурбіни. Потужність і витрата гідронасоса розраховуються як [71]:

$$P_1 = \frac{D}{M_{вр} \eta_{мех}} , \quad (2.36)$$

$$Q_1 = D \omega_n - k_{утеч} P_1 , \quad (2.37)$$

де D – обсяг ГН; $M_{вр}$ – момент на валу ГН; $\eta_{мех}$ – механічний ККД ГН;

ω_n – номінальна швидкість ГН; $k_{умет}$ – коефіцієнт витоку.

2.3.5.2 *Математична модель гідроаккумулятора (ГА).* Являє собою прилад для накопичення й збереження гідравлічної енергії робочої рідини (РР) з метою енергоживлення ГТ. Основні математичні моделі представляється у вид [22]

$$Q_2 = \frac{dV_{ж}}{dt}, \quad (2.38)$$

де $V_{ж}$ – обсяг РР; Q_2 – витрата ГА.

$$V_{ж} = \begin{cases} 0 & \text{при } p_0 < p_a \\ V_a \left(1 - \left(\frac{p_a}{p_0} \right)^{1/k} \right) & \text{при } p_0 > p_a, \end{cases} \quad (2.39)$$

де V_a – обсяг ГА; p_a – тиск РР у ГА; p_0 – тиск РР у каналі.

2.3.5.3 *Математична модель систем регулювання швидкості ГТ.* Швидкість ГТ забезпечується голкою, яка поступально рухається по горизонталі за допомогою сервомотора. Тому, щоб змінити потік РР, необхідно змінити положення голки. Схема з'єднання голки із сервомотором представлена на рис. 2.5 [72].

Рівняння динаміки цієї системи має вигляд:

$$J_{\mathcal{M}} \frac{d^2 \theta_{\mathcal{M}}}{dt^2} = T_{\mathcal{M}}(t) - b \frac{d\theta_{\mathcal{M}}}{dt}, \quad (2.40)$$

де $J_{\mathcal{M}}$ – момент інерції сервомотора й навантаження (кг.м²);

$\theta_{\mathcal{M}}$ – кутова швидкість сервомотора (с⁻¹)

T_m – момент сервомотора (Нм)

b – коефіцієнт тертя

Вважаючи, що двигун постійного струму регулюється за допомогою резистора, маємо

$$T_m(t) = k_m i_a(t), \quad (2.41)$$

де k_m – коефіцієнт моменту сервомотора (Нм/А); i_a – струм якоря (А)

Зміна полярності ланцюга означає зміну крутного моменту T_m й, отже, змінює напрямок обертання сервомотора. Електрорушійна сила (ЕРС) пропорційна електричному потоку і швидкості обертанням сервомотора

$$e_b(t) = k_b \frac{d\theta_m}{dt}, \quad (2.42)$$

де k_b – коефіцієнт проти-ЕРС (В/рад/с)

Диференціальне рівняння електричного ланцюга має вигляд

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a(t) + e_b(t) = u_m(t), \quad (2.43)$$

де L_a – індуктивність якоря; R_a – опір якоря; u_m – напруга сервомотора.

Крім того, передбачається, що кожний повний оберт вала сервомотора викликає лінійне переміщення голки 1 мм, тобто

$$x(t) = k_r \theta_m(t), \quad (2.44)$$

де x – лінійне переміщення голки (м);

k_r – константи коефіцієнт пропорційності.

Вважаючи, що значення L_{π} незначне, отже, $L_{\pi} \frac{di_{\pi}}{dt}$ можна знехтувати. Тоді після підстановки (2.40), (2.41), (2.44) в (2.43) і перетворення Лапласа одержимо:

$$W_1(s) = \frac{x(s)}{U(s)} = \frac{K_n}{s(T_n s + 1)} \quad K_n = \frac{k_{\pi} k_r k_0}{R_{\pi} b + k_{\pi}^2} \quad k_0 = \frac{U_0}{x_0} \quad T_n = \frac{R_{\pi} J_{\pi}}{R_{\pi} b + k_{\pi}^2} \quad (2.45)$$

де k_{π} – коефіцієнт моменту сервомотора;

k_r – коефіцієнт відношення лінійної переміщення стрілки з вала мотора;

U_0 – початкова напруга сервомотора; x_0 – початкове положення стрілки;

R_{π} – опір якоря сервомотора; b – коефіцієнт тертя (Нм.с/рад).

Передатна функція (2.45) представляє модель голки. Це рівняння визначає переміщення голки при регулюванні напруги сервомотора.

2.3.5.4 Математична модель гідротурбіни. Нелінійну модель гідротурбіни може одержати за умови [72], що РР нестислива, трубопроводи не пружні, втрати тиску в системі незначні, швидкість РР у трубопроводі пропорційна рівню відкриття клапана й корінь квадратний від висоти РР стовпа (у цьому випадку, пропорційна з тиском у ГА), механічна потужність ГТ пропорційна тиску й витраті РР через неї. Таким чином, характеристики напірного трубопроводу й турбінних параметрів визначаються рівняннями, пов'язаними із прискоренням стовпця РР, РР у напірному трубопроводі, гідротурбіні й механічних потужностей. З умови 2, по 2-ому закону Ньютона, одержимо рівняння прискорення РР стовпа в трубопроводі [72]

$$\rho L A_L \frac{dv}{dt} = -A_L \rho g (H - H_0), \quad (2.46)$$

де v – швидкість РР (м/с);

L, A_L – відповідно довжина й площа поперечного перерізу напірного проводу (м, м²);

ρ – щільність РР; g – гравітаційне прискорення (м/с^2);

ρLA_L – маса РР у каналі (кг);

$\rho g(H - H_0)$ – різниця між статичним тиском стовпа РР і тиском у розподільнику.

Враховуючи потік РР у турбіні Q пропорційно швидкості РР через трубопровід, тобто

$$Q = A_L v, \quad (2.47)$$

Поставимо (2.50) в (2.49) одержимо рівняння зміни швидкість потоку

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{g}{LA_L}(H - H_0) \quad T_{w0} = \frac{LQ_n}{gA_L H_n} = \frac{Lv_n}{gH_n} \quad (2.48)$$

де $\bar{Q} = \frac{Q}{Q_n}$, Q_n , H_n – номінальне значення потоку й висота стовпа РР;

T_{w0} - початковий час РР при номінальному навантаженні й має фіксованим значенням для напірного трубопроводу.

Швидкість РР у напірному трубопроводі й

$$v = k_v x \sqrt{H}, \quad (2.49)$$

де: x_u – положення голки; H – висота стовпа РР; k_v – коефіцієнт пропорційності.

Потік РР через турбіну задається

$$Q = A_L k_v x \sqrt{H}, \quad (2.50)$$

Механічна потужність гідротурбіни

$$P_{зм} = k_p QH, \quad (2.51)$$

де k_p – коефіцієнт пропорційності.

Потужність гідротурбіни із втратами:

$$P_{зм} = (k_p Q - Q_{хл})H, \quad (2.52)$$

де $Q_{хл}$ – холостий потік РР у системі.

Ця модель підходить для дослідження систем з великою зміною вихідної потужності й частоти. Але при малих відхиленнях навколо робочої точки, використовуємо лінеаризовані моделі. Відхилення потужність гідротурбіни розраховується

$$\Delta \bar{P}_{зм} = 3\Delta \bar{Q} - 2\Delta \bar{x} \quad (2.53)$$

де Δ – позначає малого відхилення;

$\Delta \bar{x} = \frac{\Delta x}{x_{н0}}$ – відхилення положення голки; $\Delta \bar{Q} = \frac{\Delta Q}{Q_0}$ відхилення потужності.

Перепишемо рівняння (2.46) для прискорення потоку води

$$(\rho L A_L) \frac{d(\Delta v)}{dt} = -A_L (\rho g) \Delta H, \quad (2.54)$$

розділивши обидві частини рівняння на $A_L \rho g H_0 v_0$ одержимо

$$\frac{L v_0}{g H_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta v}{v_0} \right) = - \frac{\Delta H}{H_0}, \quad (2.55)$$

де Δv – зміна швидкість води;

$\rho g \Delta H$ – збільшення тиск у колекторі розподільника.

Поставимо $\nu = \frac{Q}{A_L}$ й $T_\omega = \frac{LQ_0}{gAH_0} = \frac{Lv_0}{gH_0}$ в (2.55) одержимо

$$\frac{d}{dt} \frac{\Delta Q}{Q_0} = \frac{1}{T_\omega} \frac{\Delta H}{H_0}, \quad (2.56)$$

де T_ω – початковий час РР, може інтерпретувати як час для прискорення стовпа РЖ H_0 до швидкості v_0 .

Значення T_ω пов'язане з його значенням при номінальному навантаженні на T_{w0}

$$T_\omega = \frac{\nu_0}{\nu_r} \frac{H_r}{H_0} T_{w0}, \quad (2.57)$$

Відношення між зміною потоку й зміною позиції голки

$$T_\omega \frac{d\bar{\Delta Q}}{dT} = 2 \left(\bar{\Delta x} - \bar{\Delta Q} \right), \quad (2.58)$$

Перетворимо Лапласа до цього рівняння, одержимо

$$\bar{\Delta Q} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} T_\omega s} \bar{\Delta x}. \quad (2.59)$$

Поставимо рівняння (2.53) в (2.59) одержимо передатну функцію лінеаризованої моделі для ГТ при малих відхиленнях навколо робочої точки.

$$\frac{\Delta P_{zm}(s)}{\Delta x(s)} = \frac{1 - T_\omega s}{1 + \frac{1}{2} T_\omega s}, \quad (2.60)$$

Це рівняння визначає потужність гідротурбіни й впливає на зміни положення голки, враховуючи гідротурбін ідеальної й ігноруючи втрати.

2.3.6 Математичне моделювання синхронного генератора. У роботі використовується математична модель СГ і його системи збудження, описана в [73].

Усі змінні системи рівнянь у відносних одиницях (о.е.): s – ковзання; r – активний опір статора; x_s – реактивний опір розсіювання; $x_{d,q}$ – синхронний реактивний опір по поздовжній і поперечній осі; x'_q, x''_q – перехідне й зверхперехідний реактивний опір по поперечній осі; x'_d, x''_d – перехідне й зверхперехідний реактивний опір по поздовжній осі; x_c – реактивний опір системи; $\Psi_{d,q}$ – потокозчеплення по поздовжній і поперечній осі; $\Psi_{rd,rq}$ – потокозчеплення за спокійливих контурів по поздовжній і поперечній осі; Ψ_f, Ψ_{if} – струм і потокозчеплення контуру порушення СГ;

$$\left. \begin{aligned}
 p\Psi_d &= ri_d - (1+s)\Psi_q + u_d; \\
 p\Psi_q &= -ri_q + (1+s)\Psi_d - u_q; \\
 p\Psi_f &= \frac{1}{T_{d0}}u_f - \frac{1}{T_{d0}x_{fs}}(x_f\Psi_f + x_{ad}e_{id}) \\
 p\Psi_{rd} &= \frac{1}{T_{rd}x_{rds}}(x_{ad}e_{id} - x_{rd}\Psi_{rd}); \\
 p\Psi_{rq} &= \frac{1}{T_{rq}x_{rqs}}(x_{aq}e_{iq} - x_{rq}\Psi_{rq}); \\
 i_f &= \frac{x_f}{x_{fs}}\Psi_f - \frac{x_{ad}}{x_{fs}}e_{id}; \\
 i_d &= -\frac{1}{x_s}\Psi_d + \frac{1}{x_s}e_{id}; \\
 i_q &= \frac{1}{x_s}\Psi_q - \frac{1}{x_s}e_{id}; \\
 e_{id} &= \frac{1}{\alpha}\left(\frac{x_{ad}}{x_s}\Psi_d + \frac{x_f}{x_{fs}}\Psi_f + \frac{x_{rd}}{x_{rds}}\Psi_{rd}\right); \\
 \alpha &= 1 + x_{ad}\left(\frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_{fs}} + \frac{1}{x_{rds}}\right); \\
 e_{iq} &= \frac{1}{\beta}\left(\frac{x_{aq}}{x_s}\Psi_q + \frac{x_{rq}}{x_{rqs}}\Psi_{rq}\right); \\
 \beta &= 1 + x_{aq}\left(\frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_{rqs}}\right); \\
 ps &= \frac{M_M}{T_j} - \frac{1}{T_j}(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d).
 \end{aligned} \right\} (2.61)$$

$i_{d,q}, u_{d,q}$ – струм і напруги по поздовжній і поперечній осі; T_{d0} – постійна часу обмотки збудження СГ при розімкнутій обмотці статора; T'_d, T'_q – перехідна постійна часу по поздовжній і поперечній осі; T''_d, T''_q – зверхперехідна постійна часу по поздовжній і поперечній осі; Tr_d, Tr_q – постійна часу поздов-

жнього й поперечного заспокійливих контурів; θ – кут між вектором напруги U і віссю q ; δ – кут між синхронною віссю й віссю q .

Розрахунки параметрів синхронної машини за каталожним даними виконується з використанням наступних формул [73]:

$$\begin{aligned}xad &= xd - xs; \quad xaq = xq - xs; \quad xf = xad^2 / (xd - xd'); \quad xf' = xf - (xad^2 / xd); \\rf &= xf' / (Td' w_0); \quad xrd = xad^2 (xf - 2xad + xd - xd') / [xf(xd - xd') - xad^2]; \\xrd' &= xrd - (xad^2 / xd); \quad xrd'' = xrd' \cdot xd' / xd; \quad Trd'' \gg Td''; \\rrd &= xrd'' / (Td'' w_0); \quad rrq \gg 1.5 rrd; \quad xrq = xaq^2 / (x_q - xq').\end{aligned}$$

Для моделювання роботи системи збудження СГ прийемо рівняння, запропоновані в [73]:

$$\left. \begin{aligned}T_e \frac{dE_{qe}}{dt} + E_{qe} &= U_p + E_{qe0} + U_\phi; \\E_{qe} &= \frac{X_{ad}}{R_f} U_p; \\E_{\min} &< E_{qe} < E_{\max}; \\ \left. \begin{aligned}E_{\min} &= E_{qe \min} \\E_{\max} &= E_{qe \max}\end{aligned} \right\} &\text{якщо } E_{q \min} < E_q < E_{q \max}; \\ \left. \begin{aligned}E_{\min} &= E_{qe \min} \\E_{\max} &= E_{qe \max}\end{aligned} \right\} &\text{якщо } E_q > E_{q \max}; \\ \left. \begin{aligned}E_{\min} &= E_{q \min} \\E_{\max} &= E_{qe \max}\end{aligned} \right\} &\text{якщо } E_q < E_{q \min},\end{aligned} \right\} \quad (2.62)$$

де E_{qe} – напруга на затискачах обмотки збудження; U_p – вихідний сигнал від АРЗ; E_q – синхронна ЕРС; U_ϕ – вихідний сигнал від форсування збудження, визначається з рівняння:

$$T_\phi \frac{dU_\phi}{dt} + U_\phi = V_\phi.$$

Передатна функція АРЗ сильної дії має вигляд:

$$U_p = \frac{1}{pT_p + 1} \left[\left(K_{ou} + \frac{pK'_u}{pT'_u + 1} \right) \cdot (U - U_{уст}) + \frac{1}{pT_\omega + 1} \left(\frac{T_{o\omega}K_{o\omega}}{pT_{o\omega} + 1} + \frac{pK'_\omega}{pT'_\omega + 1} \right) \cdot (\omega_u - \omega_0) + \frac{pK'_e}{pT'_e + 1} \cdot (E_q - E_{q\text{ уст}}) \right], \quad (2.63)$$

де $p = \frac{d}{dt}$ – оператор диференціювання;

K_{ou}, K'_u – коефіцієнти підсилення по відхиленню напруги і його похідній;

$K_{o\omega}, K'_\omega$ – коефіцієнти підсилення по відхиленню частоти і її похідній;

K'_e – коефіцієнт гнучкого зворотного зв'язку по струму порушення;

U, ω_u – напруга й частота напруги статора;

E_q – синхронна ЕРС (пропорційна току порушення);

$U_{уст}, E_{уст}$ – значення уставок;

T_p – постійна часу загального каналу регулятора;

T_ω – постійна часу блоку виміру частоти;

$T_{\omega 0}$ – постійна часу фільтра постійної складовій;

T'_u, T'_ω, T'_e – постійні часу ланок, що диференціюють.

2.3.7 Синтез традиційного ПД-Регулятора швидкості гідротурбіни. Основне завдання регулятора швидкості ГТ – регулювання частоти обертання гідротурбіни на номінальне значення, ω_{ref} . При зміні навантаження швидкість ГТ змінюється, з'являється неприпустима частота системи. Щоб уникати цього, у проектуванні системи керування вимагає, щоб похибки по швидкості ГТ перебували в межах $\pm 2\%$.

Рис. 2.5 ілюструє блок-схему системи регулятора швидкості турбіни Пелтона [22].

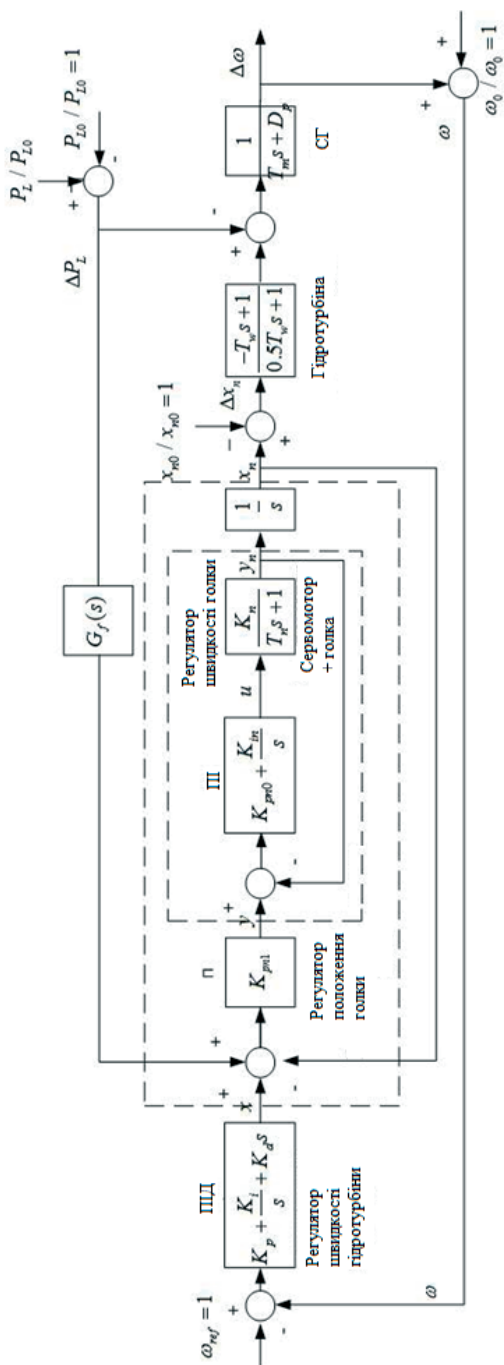


Рис. 2.5 – Блок схема регулювання швидкості гідротурбіни

Пропонується П-П регулятор, щоб регулювати положення голки й ПІД-регулятор для регулювання швидкості турбіни [22]. Регулювання положення голки, мабуть, приступати перед тим, коли починається регулювати швидкості турбіни. Таким чином, коефіцієнти регулятори K_{p0} , K_{in} і K_{p1} засновані на переміні полюсів. Усередині цикл має регулятор швидкості голки розподільника, а зовнішній цикл регулює її переміщення.

Коефіцієнти K_{p0} , K_{in} визначаються як 2 закритих поля, визначає $a=cb$, де b заданий коефіцієнт системи П-П й проєктований коефіцієнт із >1 . Рівняння характеристично внутрішнього циклу

$$s^2 + \left(\frac{K_n K_{pn0} + 1}{M_n} \right) s + \frac{K_n K_m}{M_n} = 0, \quad (2.64)$$

$$\text{де } K_{pn0} = -\frac{2M_n cb + 1}{K_n}, K_{in} = \frac{M_n}{K_n} c^2 b^2, K_{p1} = \frac{b^2(2c - c^2 - 1)}{c^2 - 2cb - M_n^{-1}},$$

Рівняння для ПІД-регулятора швидкості обертання турбіни

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (2.65)$$

де K_p , K_i , K_d – коефіцієнт виконання.

З метою зм'якшення ефектів нестабільної турбіни й зміни швидкості, додається ще регулятор, як показано на рис. 2.5. Цей регулятор працює перед включенням регулятора внутрішнього циклу (регулювання голки). Навантажувальна електрична потужність PL визначається від струму й напруги.

Передатна функція зворотного регулятора

$$G_f(s) = [C_n(s)G_2(s)]^{-1}, \quad (2.66)$$

де $C_n(s)$ - передатна функція керування положенням голки.

Інверсійна функція $C_n(s)G_2(s)$ не реалізується поки нестабільна, тому $G_f(s)$ апроксимується статичним коефіцієнтом підсилення

$$G_f(s) \approx K_f = [C_n(0)G_2(0)]^{-1} = 1. \quad (2.67)$$

2.3.8. Розробка й перевірка адекватності комп'ютерної моделі гідротурбіни як об'єкта керування.

2.3.8.1. Коротка характеристика програмного пакета МАТЛАБ. МАТЛАБ – це мова програмування, призначена для наукових розрахунків [74]. Він забезпечений великою бібліотекою, яка безупинно поповнюється. Важливо також, що в мові МАТЛАБ є бібліотека блоків Simpowersystems (у версії МАТЛАБ 6.1 і раніше – Powersystemblockset), яка містить набір блоків для імітаційного моделювання електротехнічних пристроїв.

До складу бібліотеки входять моделі пасивних і активних електротехнічних елементів, джерел енергії, електродвигунів, трансформаторів, ліній електропередачі й т.п. обладнання. Є також розділ утримуючий блоки для моделювання пристроїв силової електроніки, включаючи системи керування для них.

2.3.8.2 Матлаб-Модель регулятора швидкості гідротурбіни зі СГ. Моделювання в МАТЛАБ дозволяє моделювати перехідні процеси електромеханічного контуру ХЕС при різних комутаціях і подіях, що відбуваються в системі, відключення/включення вузла; відключення генераторів; коректування навантаження у вузлі; відключення/включення синхронної машини; втрата порушення синхронної машини; відключення/включення асинхронної машини і т.д.

Схема моделювання регулятор гідротурбіни із синхронним генератором (СГ 60КВт, 400В, 50Гц) представлено на рис. 2.6-2.9.

У процесі складання моделі СГ і запуску потрібно використовувати блок Powergui – інтерфейс користувача для аналізу схем і систем. Блок Powergui забезпечує корисний графічний інтерфейс користувача інструментальні засоби для аналізу моделей Simpowersystems.

Для перевірки вірогідності роботи моделі розглянемо її роботу в різних режимах. Результат моделювання перехідного режиму САР швидкості при набросі 25% навантаження при включенні на $t=3$ с і відключенні на $t=6$ с (рис. 2.12,а).

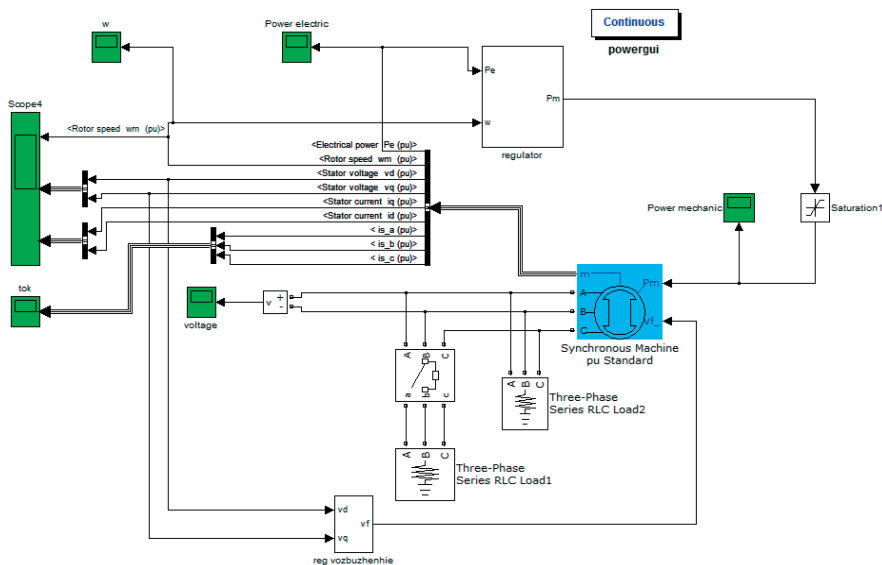


Рис. 2.6 – Схема гідротурбіни з синхронним генератором.

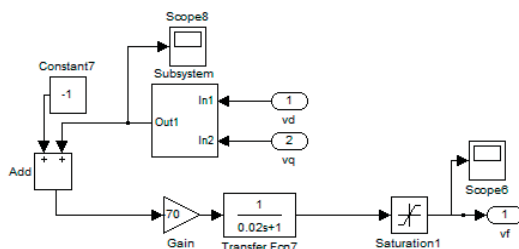


Рис. 2.7 – Канал регулювання збудження по відхиленню напруги.

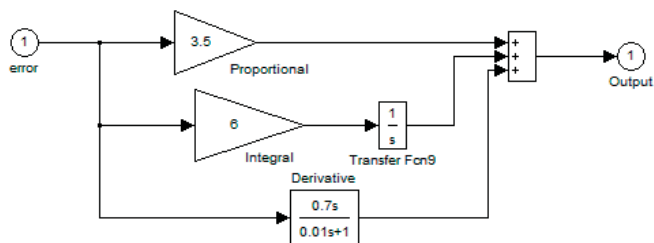


Рис. 2.10 – Традиційний ПІД-регулятор частотою обертання ГТ.

МАТЛАБ-модель гідротурбіни представлена на рис. 2.11.

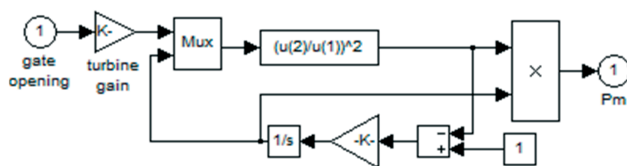


Рис. 2.11 – Нелінійна модель гідротурбіни.

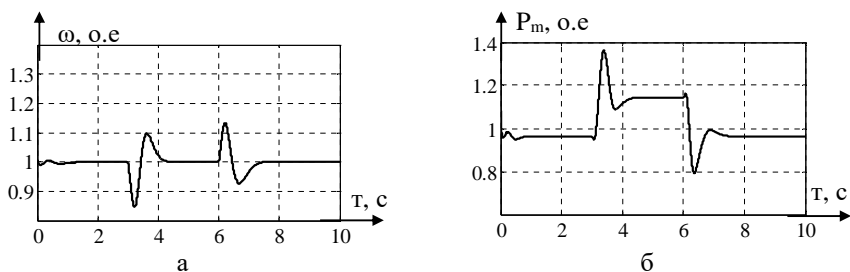
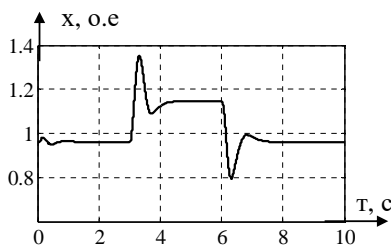


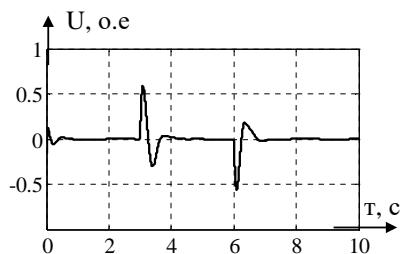
Рис. 2.12 – Результат моделювання гідротурбіни:

а) - зміни частоти ω , б) – зміни потужності турбіни P_m

Сигнал управління голки і її переміщення представлена на рис. 2.12,б і рис. 2.13,а,б.



а



б

Рис. 2.13 – Результат моделювання голки:

а) - зміна координати голки x , б) - керуючий сигнал U

Параметри симулятора й регулятора проведені в табл. 2.1. Коефіцієнт для ПІД-регулятора частоти обертання гідротурбіни $K_{\Pi} = 3,5$; $K_{\Pi} = 6$; $K_{\text{д}} = 0,7$ забезпечує швидкодію систем регулятора.

Таблиця 2.1 – Параметри симулятора й регулятора

Коефіцієнт	Значення	Вимір
K_{pn1}	1,7	--
K_{pn0}	0,097	--
K_{in}	8,374	--
K_{n}	4,423	о.е
T_{n}	0,0612	с
T_{w}	0.04	с

У ході комп'ютерних випробувань були отримані наступні результати:

1. Режим наброса навантаження на 25%.

Система регулювання кутову швидкість із ПІД-регулятором має наступні показники: час перехідного процесу – до 1,3 с; перерегулювання – 9,6%; коливальність.

2. Режим скидання навантаження на 25%.

Система збудження ХЕС із ПІД-регулятором має наступні показники: час перехідного процесу – до 1,5 с; перерегулювання – 13,4%; коливальність.

Таким чином, модель, реалізована в МАТЛАБ, є достовірною й може використовуватися для дослідження ефективності роботи системи керування.

2.4 Експериментальні дослідження макета ХЕС в дослідному басейні

2.4.1 Структура басейнової установки. Для перевірки ефективності роботи ГЕЕ із гнучким елементом був створений експериментальний макет.

До складу макета входять наступні (див. рис. 2.14,а): рамки довжиною 6 метрів; важелі довжиною 0,85 метри, відстань між важелями 0,25 метри.



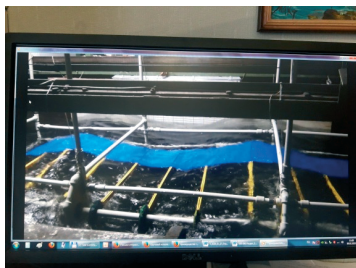
в



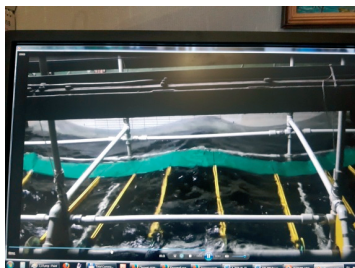
а



б



г



д

Рис. 2.14 – Басейнові випробування: а) макет ХЕС; б) вимірювальний стенд для виміру характеристик обертання вала; в) індуктивний датчик; г) і д) фрагменти випробувань СГГ різної ширини

Гнучка стрічка: ширина 100 мм 200 мм 300 мм, довжина 6,1м-0,25 мм, товщина 0,5 мм, храповики 31 шт. Вимірювальний стенд для виміру швидкості обертання вала (рис. 2.14, б, в).

До складу стенда входить датчик (рис. 2.14,в), пристрій узгодження з LPT-портом комп'ютера й програмне забезпечення.

Технічні характеристики:

тип датчика – індуктивний;

число лопатей у крильчатці – 11;

максимальна вимірювана частота обертання вала – 27 об/хв;

напруга джерела живлення – 12..18 В.

Довжина кабелю від датчика до комп'ютера – 15 м

Стенд призначений для виміру характеристик обертання вала: середньої частоти й нерівномірності його обертання й виводити отримані дані в графічному вигляді. Принципова схема стенда презентовано на рис. 2.15.

Для проведення експерименту було розроблено і виготовлено спеціальне програмне забезпечення й комп'ютер.

2.4.2 Методика проведення випробувань. Основною частиною математичної моделі ХЕС, вірогідність якої необхідно підтвердити, є модель системи «ГЕЕ – вал ХЕС». При цьому роботу гідроаккумулятора будемо імітувати, створюючи навантажувальний момент на валу ХЕС:

$$M_n = F_n r_v;$$

де r_v – радіус вала ХЕС, F_n – сила опору обертання вала. Величину F_n створимо шляхом підвішування привантажувача масою m_n за допомогою блоку на тросі, кінець якого закріпимо на валу ХЕС

Тоді момент на валу ХЕС буде визначатися по формулі

$$M_n = m_n g r_v;$$

де g – прискорення вільного падіння, g приймемо рівним 9,81 м/с².

При генеруванні хвиль із заданими параметрами вал ХЕС буде обертатися з відповідною швидкістю обертання ω .

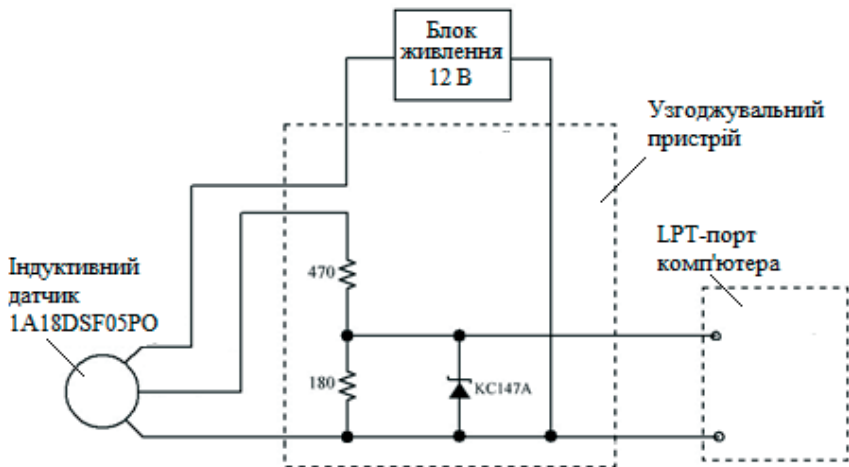


Рис. 2.15 – Принципова схема стенда.

Вироблювану потужність P_v механічної частини ХЕС знайдемо за відомим законом:

$$P_v = M_n \omega.$$

При цьому енергію, накопичену гідроаккумулятором, одержимо з відомих рівнянь сили F і енергії E деформації пружного тіла:

$$F = -kx;$$

$$E = 0,5kx^2;$$

де k – коефіцієнт пружності, x – міра деформації.

Об'єднавши ці рівняння, отримаємо

$$E = \frac{F^2}{2k}.$$

Іншими словами, потенційна енергія пружного деформованого тіла пропорційна квадрату сили, створюваної цим тілом. Замінімо в цій виразі силу F на момент M і отримаємо

$$E = \frac{M^2}{2kl^2};$$

де M – момент, який створює пружне деформоване тіло із плечем l .

Виразимо в даному виразі момент M через потужність і частоту обертання, об'єднаємо коефіцієнт жорсткості k і плече l і одержимо залежність енергії гідроакумулятора від вироблюваної потужності й частоти обертання вала ХЕС:

$$E_a = \frac{P_B^2}{2k_a \omega^2};$$

де k_a – коефіцієнт, що враховує конструктивні особливості гідроакумулятора.

Таким чином, експериментальне дослідження буде містити такі етапи:

- установку на макет ХЕС гнучкої стрічки заданої довжини L_d і ширини w ;
- вибір маси при вантажу m_n для імітування роботи гідроакумулятора;
- генерування хвиль із незмінними параметрами: амплітудою A , частотою й швидкістю поширення c ; вимір параметрів хвиль для контролю цих параметрів;
- вимір швидкості обертання вала ω .
- повторення всіх етапів для різних значень m_n , L_d і w ;
- занесення результатів у формуляр.

Обробка експериментальних даних буде містити такі етапи:

- розрахунки середніх значень швидкості обертання вала ω_{cp} для кожних m_n , L_d і w ;
- розрахунки моменту на валу ХЕС M_n , виробленої потужності P_v і енергії гідроакумулятора E_a .

2.4.3 Проведення й результати експерименту. Виконаємо генерування хвиль і вимір їх параметрів. Багаторазове генерування хвиль показало, що параметри утворюваної хвилі відповідають таким значенням: амплітуда $A = 0,06 \pm 0,005$ м, частота $n = 2 \pm 0,05$ радий/з, швидкість $c = 1 \pm 0,01$ м/с.

Установимо на макет ХЕС гнучку стрічку довжиною $L_{\text{л}} = 5,9$ м і шириною $w = 0,1$ м, виконаємо виміри швидкості обертання вала при різних масах привантажувачів і запишемо результати у вигляді (табл. 2.2)

$$\omega = \omega_{cp} \pm e_{\omega};$$

де ω_{cp} – середньостатистична швидкість обертання вала при незмінній масі привантажувача, e_{ω} – абсолютна похибка виміру швидкості обертання вала. Величина e_{ω} розраховується по відомій формулі

$$e_{\omega} = k_s \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i - \omega_{cp})^2}{n(n-1)}};$$

де n – кількість вимірів, k_s – коефіцієнт Стюдента, який при $n=3$ і довірчої ймовірності 0,9 рівний 2,353.

Таблиця 2.2 – Результати експерименту при $L_{\text{л}} = 5,9$ м і $w = 0,1$ м.

№	m , кг	ω_1 , рад/с	ω_2 , рад/с	ω_3 , рад/с	$\omega \pm e_{\omega}$, рад/с
1	m = 0,710	0,69	0,61	0,61	$0,61 \pm 0,063$
2	m = 0,950	0,61	0,6	0,6	$0,6 \pm 0,008$
3	m = 1,080	0,58	0,54	0,58	$0,58 \pm 0,031$
4	m = 1,65	0,54	0,56	0,54	$0,54 \pm 0,016$
5	m = 3,50	0,41	0,41	0,43	$0,41 \pm 0,016$
6	m = 4,37	0,32	0,3	0,3	$0,3 \pm 0,016$
7	m = 4,74	0,21	0,3	0,21	$0,21 \pm 0,071$
8	m = 5,15	0	0	0	0

Виконаємо розрахунки моментів на валу ХЕС $M_{\text{в}}$, виробленої потужності $P_{\text{в}}$ і енергії гідроакумулятора E_a . Оскільки $P_{\text{в}}$ і E_a залежні від ω , то для цих величин також розрахуємо відповідні абсолютні похибки e_p і e_e (таблиця 2.3).

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку P_B та E_a для $L_{\text{л}} = 5,9$ м і $w = 0,1$ м.

№	$M_{\text{п}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$P_B \pm e_P, \text{Вт}$	$E_a \pm e_E, \text{Дж}$
1	0.111	$7,112 \cdot 10^{-3}$	$6,197 \cdot 10^{-3}$
2	0.149	$9,359 \cdot 10^{-3}$	0,011
3	0.169	0,01	0,014
4	0.259	0,015	0,033
5	0.549	0,024	0,151
6	0.685	0,022	0,235
7	0.743	0,016	0,276

У результаті побудуємо графічну залежність між виробленою потужністю P і енергією E і порівняємо із графіком комп'ютерної моделі (рис.2.16). $P_B = f(E_a)$. При цьому за даними експерименту й моделювання гідродинамічний коефіцієнт ch був скорегований: $ch = 1,67$. Корекція коефіцієнта забезпечила співпадіння результатів у межах 17,83% (табл 2.4).

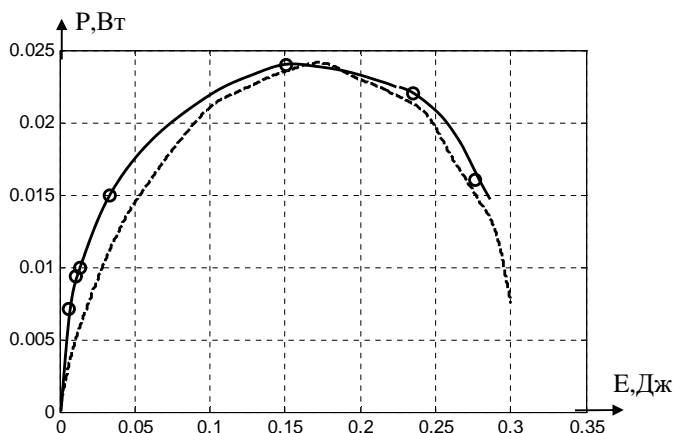


Рис. 2.16 – Залежність між виробленою потужністю P

і енергією E при $L_{\text{л}} = 5,9$ м і $w = 0,1$ м:

« — » експериментальне моделювання

«-----» комп'ютерне моделювання

Таблиця 2.4 – Результати порівняння з комп'ютерною моделлю

P_B Вт(експ)	P_B Вт(комп)	E_a Дж (експ)	E_a Дж (комп)	різниця, $P_{\max}\%$
$7,112 \cdot 10^{-3}$	$3,197 \cdot 10^{-3}$	$6,197 \cdot 10^{-3}$	$1,773 \cdot 10^{-2}$	16,31
$9,359 \cdot 10^{-3}$	$5,081 \cdot 10^{-3}$	0,011	0,026	17,83
0,01	$6,038 \cdot 10^{-3}$	0,014	0,029	16,51
0,015	0,011	0,033	0,054	16,67
0,024	0,024	0,151	0,164	0
0,022	0,021	0,235	0,221	4,17
0,016	0,015	0,276	0,271	4,17

Установимо на макет ХЕС гнучку стрічку довжиною $L_{\text{л}} = 6$ м і шириною $w = 0,1$ м. Виконаємо вимір швидкості обертання вала при різних масах привантажувачів і розрахуємо абсолютну похибку виміру e_{ω} . Результати експерименту зведені в табл. 2.5.

Виконаємо розрахунки моментів на валу ХЕС M_n , виробленої потужності P_B і енергії гідроакумулятора E_a . Оскільки P_B і E_a залежні від ω , то для цих величин також розрахуємо відповідні абсолютні похибки e_p і e_e (таблиця 2.6).

Таблиця 2.5 – Результати експерименту при $L_{\text{л}} = 6$ м і $w = 0,1$ м.

№	m_n , кг	ω_1 , рад/с	ω_2 , рад/с	ω_3 , рад/с	$\omega \pm e_{\omega}$, рад/с
1	m = 0,710	0,45	0,49	0,45	$0,45 \pm 0,031$
2	m=0,950	0,4	0,4	0,34	$0,4 \pm 0,047$
3	m=1,080	0,37	0,37	0,41	$0,37 \pm 0,031$
4	m = 2,041	0,33	0,34	0,33	$0,22 \pm 0,008$
	m=2,591	0,32	0,3	0,3	$0,3 \pm 0,016$
5	m = 3,080	0,18	0,2	0,18	$0,18 \pm 0,016$
6	m = 3,630	0	0	0	0

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку P_B и E_a для $L_{\text{л}} = 6$ м і $w = 0,1$ м.

№	$M_{\text{п}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$P_B \pm e_P, \text{Вт}$	$E_a \pm e_E, \text{Дж}$
1	0,111	$5,246 \cdot 10^{-3}$	$6,197 \cdot 10^{-3}$
2	0,149	$6,24 \cdot 10^{-3}$	0,011
3	0,169	$6,561 \cdot 10^{-3}$	0,014
4	0,259	0,011	0,051
5	0,406	0,013	0,083
6	0,549	$9,103 \cdot 10^{-3}$	0,117
7	0	0	0

У результаті побудуємо графічну залежність між виробленою потужністю P і енергією E і порівняємо з комп'ютерною моделлю (рис. 2.17).

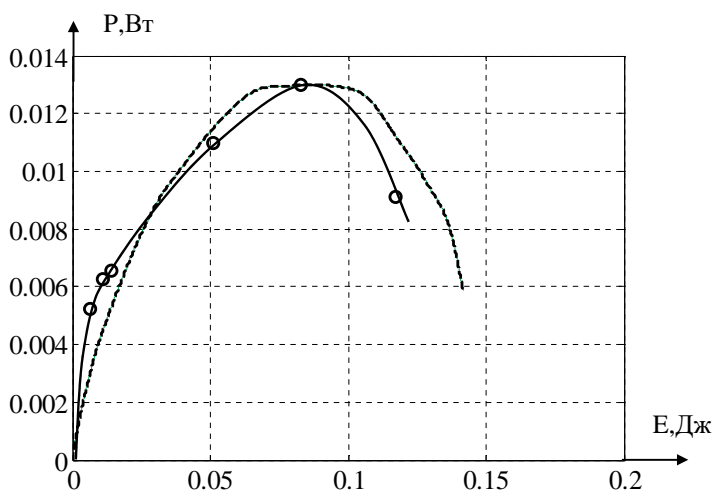


Рис. 2.17 – Залежність між вироблюваною потужністю P і енергією E при $L_{\text{л}} = 6$ м і $w = 0,1$ м

При цьому за даними експерименту й моделювання гідродинамічний коефіцієнт ch був скоректований: $ch = 1,53$. Корекція коефіцієнта забезпечила збіг результатів у межах 18,04% (табл 2.7).

Таблиця 2.7 – Результати порівняння з комп'ютерною моделлю

P_v Вт(експ)	P_v Вт(комп)	E_a Дж (експ)	E_a Дж (комп)	різниця, $P_{\max}\%$
$5,246 \cdot 10^{-3}$	$2,901 \cdot 10^{-3}$	$6,197 \cdot 10^{-3}$	$13,196 \cdot 10^{-3}$	18,04
$6,24 \cdot 10^{-3}$	$4,45 \cdot 10^{-3}$	0,011	0,018	13,77
$6,561 \cdot 10^{-3}$	$5,26 \cdot 10^{-3}$	0,014	0,019	10,01
0,011	0,012	0,051	0,047	7,69
0,013	0,013	0,083	0,083	0
$9,103 \cdot 10^{-3}$	$1,124 \cdot 10^{-2}$	0,117	0,131	16,44

Встановимо на макет ХЕС гнучку стрічку довжиною $L_{\text{л}} = 5,9$ м і шириною $w = 0,2$ м. Виконаємо вимір швидкості обертання вала при різних масах привантажувачів і розрахуємо абсолютну похибку виміру e_{ω} . Результати експерименту зведені в табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Результати експерименту при $L_{\text{л}} = 5,9$ м і $w = 0,2$ м.

№	m_n , кг	ω_1 , рад/с	ω_2 , рад/с	ω_3 , рад/с	$\omega \pm e_{\omega}$, рад/с
1	m = 2,041	0,73	1,1	0,73	$0,73 \pm 0,29$
2	m = 3,925	0,67	0,83	0,67	$0,67 \pm 0,125$
3	m = 5,655	0,64	0,87	0,64	$0,64 \pm 0,18$
4	m = 8,765	0,63	0,63	0,69	$0,63 \pm 0,047$
5	m = 9,505	0,56	0,57	0,57	$0,57 \pm 0,008$
6	m = 10,02	0,53	0,61	0,53	$0,53 \pm 0,063$
7	m = 11,845	0,35	0,37	0,37	$0,37 \pm 0,016$

Результати розрахунків моментів на валу ХЕС M_n , виробленої потужності P_v і енергії гідроакумулятора E_a . Оскільки P_v і E_a залежні від ω , то для цих величин також розрахуємо відповідні абсолютні похибки e_p і e_e проведено в табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Результати розрахунку P_v і E_a для $L_{л} = 5,9$ м і $w = 0,2$ м.

№	$M_n, \text{Н} \cdot \text{м}$	$P_v \pm e_P, \text{Вт}$	$E_a \pm e_E, \text{Дж}$
1	0.376	0.024	0,05
2	0.615	0.043	0,186
3	0.887	0,06	0,393
4	1.374	0,091	0,944
5	1.49	0,089	1,111
6	1.571	0.087	1,229
7	1.857	0,072	1,725

У результаті побудуємо графічну залежність між виробленою потужністю P і енергією E і порівняємо з комп'ютерною моделлю (рис. 2.18) $P_v = f(E_a)$. При цьому за даними експерименту й моделювання гідродинамічний коефіцієнт ch був скоректований: $ch = 2,76$. Корекція коефіцієнта забезпечила збіг результатів у межах 7,69% (табл. 2.10).

Таблиця 2.10 – Результати порівняння з комп'ютерною моделлю

$P_v \text{ Вт(експ)}$	$P_v \text{ Вт(комп)}$	$E_a \text{ Дж (експ)}$	$E_a \text{ Дж (комп)}$	різниця, $P_{\max}\%$
0.024	0,017	0,05	0,081	7,69
0.043	0,043	0,186	0,186	0
0,06	0,064	0,393	0,34	4,4
0,091	0,089	0,944	0,944	2,2
0,089	0,091	1,111	1,162	2,2
0.087	0,089	1,229	1,361	2,25
0,072	0,07	1,725	1,682	2,2

Установимо на макет ХЕС гнучку стрічку довжиною $L_{л} = 6$ м і шириною $w = 0,1$ м. Виконаємо вимір швидкості обертання вала при різних масах привантажувачів і розрахуємо абсолютну похибку виміру e_w . Результати експерименту зведені в табл. 2.11

Таблиця 2.11 – Результати експерименту при $L_d = 6,1$ м і $w = 0,2$ м.

№	m_n , кг	ω_1 , рад/с	ω_2 , рад/с	ω_3 , рад/с	$\omega \pm e_\omega$, рад/с
1	m=0,37	0,73	0,75	0,73	0,73±0,016
2	m=0,55	0,7	0,73	0,7	0,7±0,024
3	m=1,83	0,58	0,58	0,52	0,58±0,047
4	m = 2,041	0,55	0,49	0,55	0,55±0,047
5	m = 3,925	0,45	0,42	0,45	0,45±0,024
6	m = 5,655	0,41	0,35	0,35	0,35±0,047
7	m=6,205	0,28	0,29	0,28	0,28±0,008
8	m = 8,765	0	0	0	0

Результати розрахунків моментів на валу ХЕС M_n , виробленої потужності P_v і енергії гідроакумулятора E_a . Оскільки P_v і E_a залежні від ω , то для цих величин також розрахуємо відповідні абсолютні похибки e_p і e_e наведено в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Результати розрахунку P_v і E_a для $L_d = 6,1$ м і $w = 0,2$ м.

№	M_n , Н·м	$P_v \pm e_p$, Вт	$E_a \pm e_e$, Дж
1	0,058	$4,435 \cdot 10^{-3}$	$1,683 \cdot 10^{-3}$
2	0,086	$6,322 \cdot 10^{-3}$	$3,719 \cdot 10^{-3}$
3	0,287	0,017	0,041
4	0,32	0,018	0,051
5	0,615	0,029	0,189
6	0,887	0,032	0,393
7	0,973	0,029	0,473

У результаті побудуємо графічну залежність між виробленою потужністю P і енергією E і порівняємо з комп'ютерною моделлю (рис. 2.19). $P_v = f(E_a)$. При цьому за даними експерименту й моделювання гідродинамічний коефіцієнт ch

був скоректований: $ch = 1,85$. Корекція коефіцієнта забезпечила збіг результатів у межах 31,25% (табл 2.13).

Таблиця 2.13 – Результати порівняння з комп'ютерною моделлю

P_v Вт(експ)	P_v Вт(комп)	E_a Дж (експ)	E_a Дж (комп)	різниця, $P_{\max}\%$
$4,435 \cdot 10^{-3}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$	$1,683 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	11,04
$6,322 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$3,719 \cdot 10^{-3}$	0,021	14,41
0,017	0,01	0,041	0,086	21,875
0,018	0,012	0,051	0,095	18,75
0,029	0,026	0,189	0,238	9,375
0,032	0,032	0,393	0,392	0
0,029	0,03	0,473	0,497	3,125

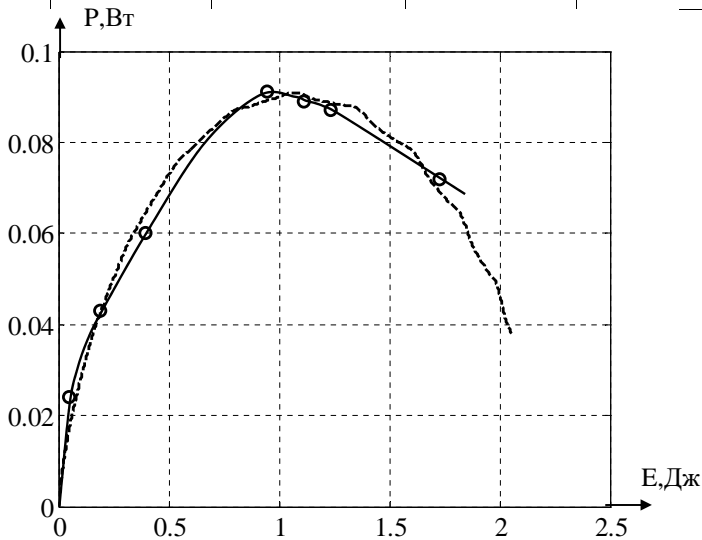


Рис. 2.18 – Залежність між виробленою потужністю P

і енергією E при $L_d = 5,9$ м і $w = 0,2$ м.

« ____ » експериментальне моделювання

«-----» комп'ютерне моделювання

Установимо на макет ХЕС гнучку стрічку довжиною $L_d = 5,9$ м і шириною $w = 0,3$ м. Виконаємо вимір швидкості обертання вала при різних масах привантажувачів і розрахуємо абсолютну похибку виміру e_ω . Результати експерименту зведені в табл. 2.14.

Таблиця 2.14 – Результати експерименту при $L_d = 5,9$ м і $w = 0,3$ м.

№	m , кг	ω_1 , рад/с	ω_2 , рад/с	ω_3 , рад/с	$\omega \pm e_\omega$, рад/с
1	$m = 2,989$	1	1	1,2	$1 \pm 0,0157$
2	$m = 4,819$	1	0,9	1	$1 \pm 0,008$
3	$m = 7,929$	1	1	0,9	$1 \pm 0,008$
4	$m = 9,749$	1	0,8	1	$1 \pm 0,0157$
5	$m = 12,859$	0,7	0,7	0,65	$0,7 \pm 0,039$
6	$m = 15,802$	0,5	0,52	0,52	$0,52 \pm 0,016$

Результати розрахунків моментів на валу ХЕС M_n , виробленої потужності P_b і енергії гідроакумулятора E_a . Оскільки P_b і E_a залежні від ω , то для цих величин також розрахуємо відповідні абсолютні похибки e_p і e_e проведено в таблицю 2.15.

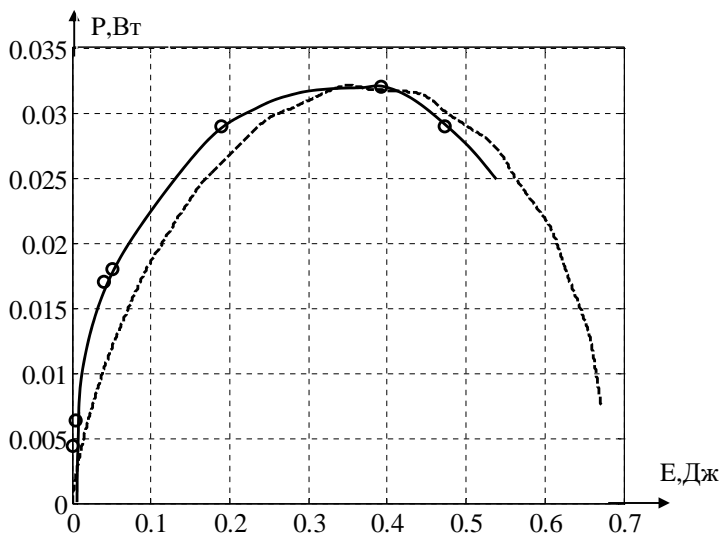


Рис. 2.19 – Залежність між виробленою потужністю P і енергією E при $L_{\text{л}} = 6,1$ м і $w = 0,2$ м.

« ____ » експериментальне моделювання

«-----» комп'ютерне моделювання

Таблиця 2.15 – Результати розрахунку $P_{\text{в}}$ і $E_{\text{а}}$ для $L_{\text{л}} = 5,9$ м і $w = 0,3$ м.

№	$M_{\text{н}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$P_{\text{в}} \pm e_P, \text{Вт}$	$E_{\text{а}} \pm e_E, \text{Дж}$
1	0.469	0.049	0,11
2	0.756	0.079	0,291
3	1.243	0,13	0,771
4	1.529	0,163	1,205
5	2.016	0,148	2,033
6	2.478	0.128	2,773

У результаті побудуємо графічну залежність між виробленою потужністю P і енергією E і порівнюємо з комп'ютерною моделлю (рис. 2.20).

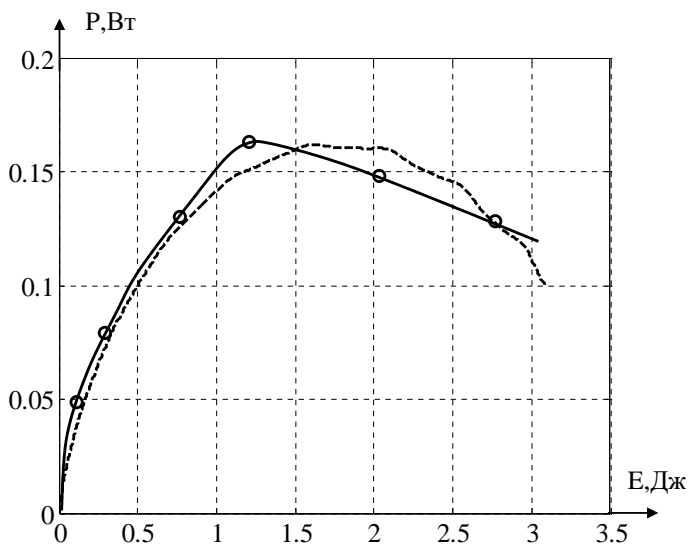


Рис. 2.20 – Залежність між виробленою потужністю P

і енергією E при $L_{\text{дл}} = 5,9$ м и $w = 0,3$ м.

« — » експериментальне моделювання

«-----» комп'ютерне моделювання

При цьому за даними експерименту й моделювання гідродинамічний коефіцієнт ch був скоректований: $ch = 3,33$. Корекція коефіцієнта забезпечила збіг результатів у межах 7,36% (табл 2.16).

Похибка між даними експерименту й моделювання не перевищує 21,875 %.

Таблиця 2.16 – Результати порівняння з комп'ютерною моделлю

P_b Вт(експ)	P_b Вт(комп)	E_a Дж (експ)	E_a Дж (комп)	різниця, $P_{\text{max}}\%$
0.049	0,037	0,11	0,163	7,36
0.079	0,072	0,291	0,333	4,29
0,13	0,126	0,771	0,832	2,45
0,163	0,151	1,205	0,162	7,36

0,148	0,16	2,033	2,425	7,36
0.128	0,128	2,773	2,773	0

Запитання для самоаналізу

1. Які основні задачі синтезу регулятора робочих режимів ХЕС?
2. З яких елементів складається структурна схема ХЕС?
3. З яких елементів складається структурна схема моделюючого комплексу ХЕС?
4. З яких елементів складається математична модель енергомодуля ХЕС?
5. Як пов'язані величини швидкості розповсюдження й довжини хвилі по глибині?
6. Які основні залежності описують поведінку гнучких тіл у водному середовищі?
7. Якими виразами описується регулятор швидкості?
8. Якими виразами описується синхронний генератор?
9. Назвіть основні елементи блок схеми регулювання швидкості гідротурбіни.
10. Назвіть основні елементи ПІД-регулятора частотою обертання ГТ.

3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПЕРВИННИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ ХВИЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

3.1. Основні параметри механічної частини хвильової електростанції як об'єкта керування

Конструкція механічної частини (МЧ) ХЕС описано в підрозділі 1.1 і характеризується параметрами, до основних з яких належать (підрозділ 2.3.2):

- довжина несучої рами ХЕС L_p ;
- довжина ГЕЕ гнучкої стрічки – L_d , цей параметр може оперативно змінюватися в процесі експлуатації ХЕС, при цьому $L_d \geq L_p$;
- ширина w , товщина b , маса m і коефіцієнт пружності k ГЕЕ;
- кількість важелів N_p , що з'єднують ГЕЕ й вал ХЕС за допомогою храпових механізмів, важелі розташовуються на однаковій відстані друг від друга;
- довжина важеля l_p , що з'єднує ГЕЕ й вал ХЕС, усі важелі мають однако-ву довжину;
- момент інерції вала ХЕС J ;
- коефіцієнт k_a , що враховує конструктивні особливості гідроаккумулятора.

Усі параметри, крім довжини ГЕЕ L_p , є конструктивними й не можуть оперативно змінюватися в процесі експлуатації ХЕС, тому в якості керуючого впливу залишається тільки один параметр L_d .

Робота ХЕС характеризується параметрами, до основних з яких належать:

- швидкість обертання вала ХЕС ω ;
- вироблена ГЕЕ потужність P_v ;
- енергія E_a , накопичена в гідроаккумуляторі.

Ефективність ХЕС характеризується параметром P_v – чим більше вироблена потужність, тем більше навантаження можна підключити, тому регульованою величиною є P_v , при цьому система автоматичного керування (САК) класифікується як екстремальна [75].

Зовнішні збурювання, які впливають на роботу САК, характеризуються параметрами хвилі, серед яких такі:

- амплітуда хвилі A ;
- частота хвилі f ;
- швидкість розповсюдження хвилі c .

Також до зовнішніх збурень відноситься споживана механічна потужність P_{π} .

Структура САК ХЕС із урахуванням особливостей її параметрів зображена на рис. 3.1.



Рис. 3.1 – Функціональна схема САК ХЕС

Режим роботи САК обумовлює особливості роботи регулятора ГЕЕ, наприклад, зміну регулятором величини L_{π} по таймеру або з урахуванням інших факторів. Слід урахувувати, що для забезпечення ефективного керування на вхід регулятора крім P_{π} також можуть надходити величини E_a , P_{π} і параметри хвилі.

3.2. Дослідження властивостей механічної частини хвильової електростанції як об'єкта керування

Виберемо для дослідження такі параметри МЧ ХЕС:

- довжина несучої рами ХЕС $L_p = 30$ м;
- довжина ГЕЕ $L_{\pi} = 35$ м;

- ширина ГЕЕ $w = 0,3$ м;
- товщина ГЕЕ $b = 2,5$ мм;
- маса погонного метра ГЕЕ нульової плавучості 750 г;
- кількість важелів $N_p = 10$ шт.;
- довжина важеля $l_p = 2$ м;
- момент інерції вала ХЕС $J = 36,3$ кг·м²;
- коефіцієнт гідроаккумулятора $k_a = 20$.

Задамо параметри хвильового впливу, що відповідають значному (3-4 бала) хвилюванню [76]:

- амплітуда хвилі $A = 1$ м;
- частота хвилі $f = 4$ радий/з;
- швидкість розповсюдження хвилі $c = 5$ м/с.

Виконаємо моделювання роботи ХЕС без навантаження ($P_n = 0$) при цих параметрах. На рис. 3.2 зображені вироблена механічна потужність P_v і накопичена гідроаккумулятором енергія E_a за перші 20 секунд моделювання.

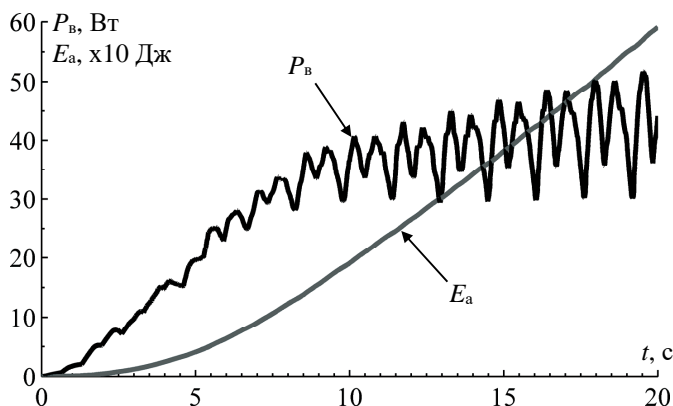


Рис. 3.2 – Вироблена потужність P_v і накопичена гідроаккумулятором енергія E_a

Як бачимо на графіку, величина P_v характеризується суттєвою нерівномірністю. Це обумовлене мінливістю дії хвилі на ГЕЕ й відповідно важелів на вал

ХЕС. Для спрощення аналізу й синтезу САК будемо усереднювати значення виробленої потужності за проміжок часу $t_c = 10$ с. На роботу САК це не вплине, оскільки немає необхідності реагувати на миттєві зміни величини P_v (рис. 3.3).

На рис.3.3 значення величини $P_{вс}(t)$ говорять про те, що, наприклад, до моменту часу $t = 15$ с вироблена потужність складала в середньому 33 Вт за останні $t_c = 10$ с, до моменту часу $t = 20$ с вироблена потужність становила в середньому 40 Вт за останні $t_c = 10$ с.

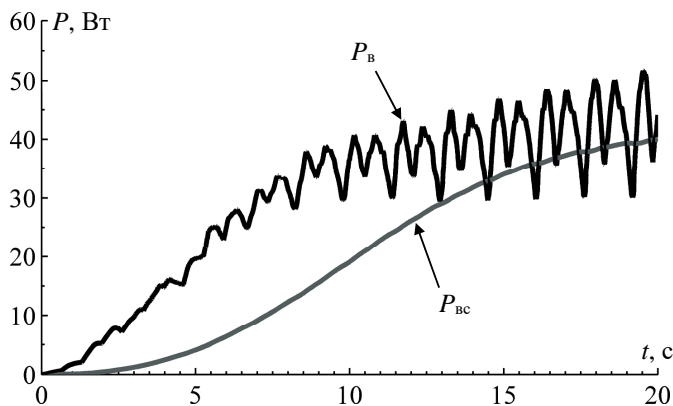


Рис. 3.3 – Вироблена потужність P_v і її усереднене значення $P_{вс}$

3.2.1. Дослідження залежності між енергією, накопиченою гідроаккумулятором, і виробленою потужністю. Виконаємо моделювання роботи ХЕС протягом щодо тривалого проміжку часу без навантаження при $P_n = 0$ (рис. 3.4).

На рис. 3.4 і на наступних зображеннях помітно деяке стовщення лінії графіка $P_{вс}$, це обумовлене коливаннями усередненої величини $P_{вс}$ у межах декількох одиниць Вт, тому що миттєва потужність P_v змінюється в широкому діапазоні значень (рис. 3.3).

Результати моделювання виявили найважливішу властивість МЧ ХЕС – вироблена потужність $P_{вс}$ залежить від енергії, накопиченої гідроаккумулятором. На графіку видно, що максимальна потужність, яку може виробляти ХЕС при обраних параметрах її МЧ і хвильового впливу, становить $P_{max} = 45$ Вт. При

цьому енергія гідроакумулятора буде становити $E_a = 1200$ Дж. На рис. 3.5 зображена залежність виробленої потужності від накопиченої гідроакумулятором енергії $P_{вс} = f(E_a)$.

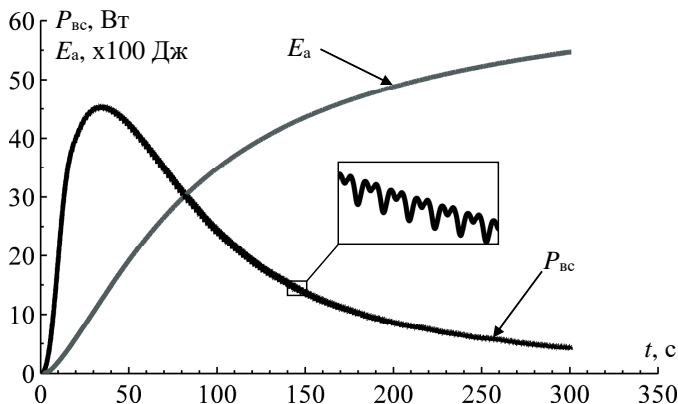


Рис. 3.4 – Моделювання роботи ХЕС за проміжок часу $t = 300$ с

Таким чином, якщо включити навантаження, що споживає механічну потужність, наприклад, $P_n = 20$ Вт у точці А, у якій $P_{вс} = 30$ Вт > 20 Вт, то енергія гідроакумулятора буде продовжувати збільшуватися зі значення $E_a = 200$ Дж до $E_a = 3800$ Дж до точки Б, пройшовши точку В, яка відповідає максимуму виробленої потужності $P_{max} = 45$ Вт (рис. 3.5). Якщо ж навантаження $P_n = 20$ Вт включити в точці Г, де $P_{вс} = 16$ Вт < 20 Вт, то гідроакумулятор протягом декількох секунд витратить накопичену енергію й вироблена потужність $P_{вс}$ буде приблизно дорівнювати нулю. Таким чином перед підключенням навантаження потрібно виділити якийсь час на нагромадження енергії гідроакумулятором, поки вироблена потужність $P_{вс}$ не перевищить значення P_n або не пройде максимум (точку В). На рис. 3.4 бачимо, що при обраних параметрах для цього буде досить часу $t = 20$ с.

Виконаємо моделювання роботи ХЕС із включенням навантаження $P_n = 40$ Вт до й після проходження точки максимуму виробленої потужності. Ре-

зультати моделювання наведені на рис. 3.6 і 3.7, деякі розбіжності за часом у реакціях величин $P_{\text{вс}}$ і E_a на включення навантаження обумовлені усередненням величини $P_{\text{вс}}$ за часом.

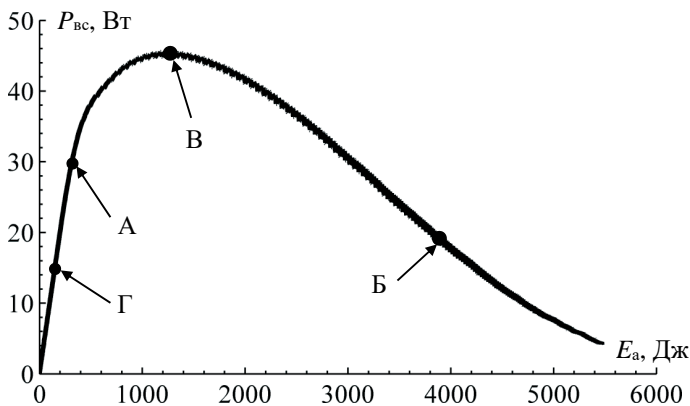


Рис. 3.5 – Залежність між виробленою потужністю $P_{\text{вс}}$ і накопиченою гідроаккумулятором енергією E_a

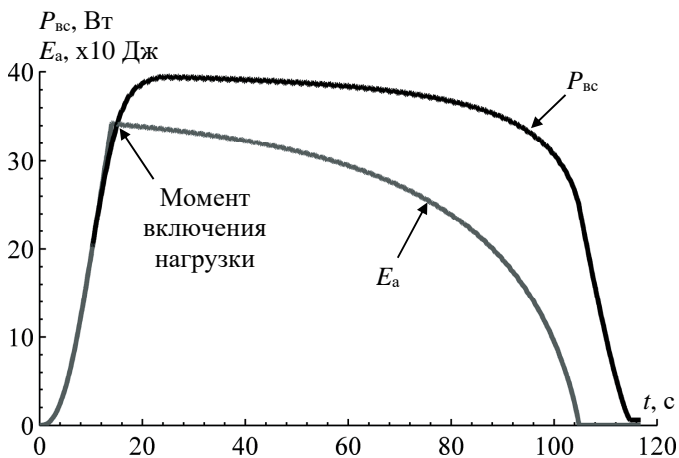


Рис. 3.6 – Включення навантаження до проходження точки максимуму виробленої потужності

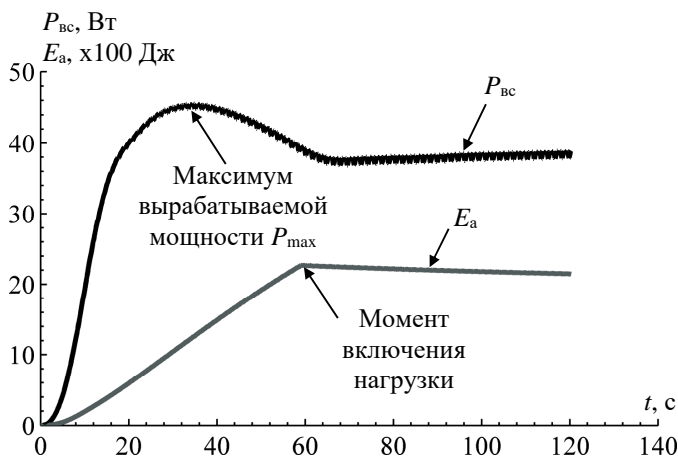


Рис. 3.7 – Включення навантаження після проходження точки максимуму виробленої потужності

На рис. 3.6 бачимо, що при включенні навантаження до проходження точки максимуму виробленої потужності енергія гідроаккумулятора спочатку плавно, потім різко зменшується, в остаточному підсумку, практично до нуля. На рис. 3.7 при включенні навантаження після проходження точки максимуму бачимо, що вироблена потужність $P_{вс}$ встановлюється на позначці 40 Вт, а енергія гідроаккумулятора E_a відповідно на позначці 2100 Дж, що відповідає залежності, приведений на рис. 3.5. Таким чином, залежності $P_{вс} = f(t)$, $E_a = f(t)$ (рис. 3.4) і $P_{вс} = f(E_a)$ (рис. 3.5) є основними для дослідження впливу конструктивних параметрів ХЕС і параметрів хвильового збурювання на величину виробленої потужності, а значить і для синтезу САК.

3.2.2. Дослідження впливу конструктивних параметрів ХЕС на величину виробленої потужності. Виконаємо моделювання роботи ХЕС, по черзі змінюючи її конструктивні параметри. Прийнемо довжину несучої рами $L_p = 20$ м, 30 м і 50 м і відповідно довжину ГЕЕ $L_n = 23$ м, 35 м і 57 м (рис. 3.8), інші параметри залишимо колишніми.

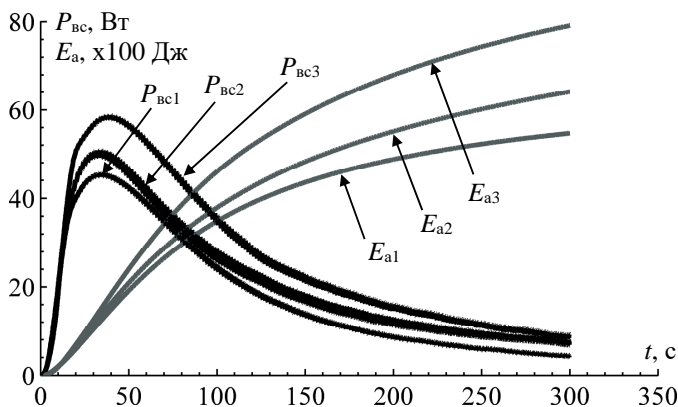


Рис. 3.8 – Моделювання роботи ХЕС при різних довжинах несучої рами

На рисунку з індексами «1» наведені залежності $P_{вс} = f(t)$ і $E_a = f(t)$ при $L_p = 30$ і $L_{дл} = 35$ м, з індексами «2» – при $L_p = 20$ і $L_{дл} = 23$ м, з індексами «3» – при $L_p = 50$ і $L_{дл} = 57$ м. Примітно, що довжина несучої рами L_p принципово не впливає на характер залежностей $P_{вс} = f(t)$, $E_a = f(t)$, а значить і на $P_{вс} = f(E_a)$. При цьому при її збільшенні зростає величина максимальної виробленої потужності P_{max} .

Змінімо ширину w , товщину b , масу m ГЕЕ й виконаємо моделювання роботи ХЕС (рис. 3.9).

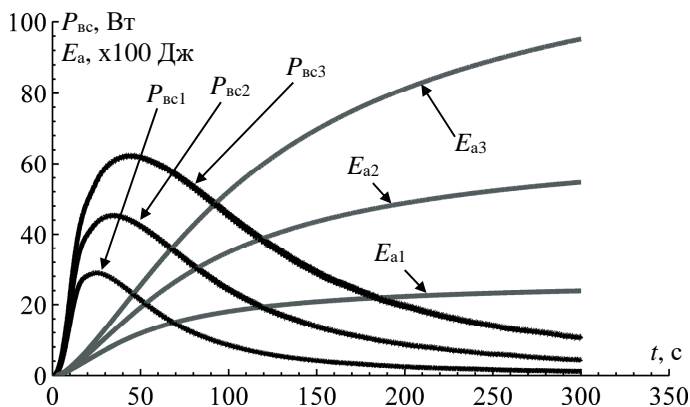


Рис. 3.9 – Моделювання роботи ХЕС при різних параметрах ГЕЕ

На рис.3.9 з індексами «1» наведені залежності $P_{вс} = f(t)$ і $E_a = f(t)$ при $w = 0,2$ м, $b = 2$ мм і $m = 14$ кг, з індексами «2» – при $w = 0,3$ м, $b = 2,5$ мм і $m = 26,25$ кг, з індексами «3» – при $w = 0,4$ м, $b = 3$ мм і $m = 42$ кг. Параметри w , b і m також не впливають на характер залежностей $P_{вс} = f(t)$, $E_a = f(t)$ і $P_{вс} = f(E_a)$. При збільшенні ширини стрічки збільшується й величина максимальної виробленої потужності P_{max} .

Змінимо кількість важелів N_p ГЕЕ, що з'єднують ГЕЕ з валом ХЕС, і виконаємо моделювання (рис. 3.10).

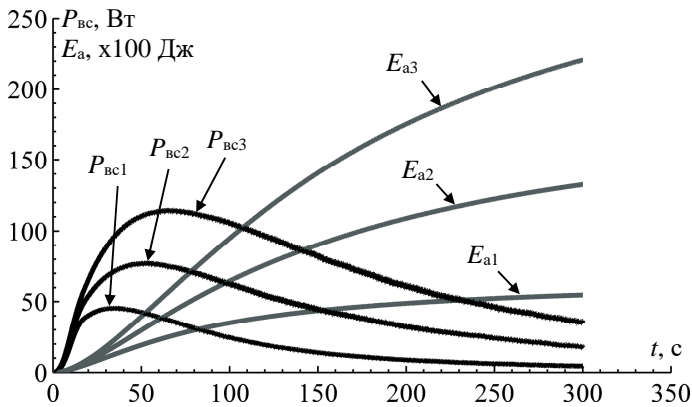


Рис. 3.10 – Моделювання роботи ХЕС при різних N_p

На рис. 3.10 з індексами «1» наведені залежності $P_{вс} = f(t)$ і $E_a = f(t)$ при $N_p = 10$, з індексами «2» – при $N_p = 20$, з індексами «3» – при $N_p = 30$. Параметр N_p не впливає на характер залежностей $P_{вс} = f(t)$, $E_a = f(t)$ і $P_{вс} = f(E_a)$. При його збільшенні величина максимальної виробленої потужності P_{max} також збільшується.

Змінимо довжину важеля l_p , що з'єднує ГЕЕ й вал ХЕС, і виконаємо моделювання (рис. 3.11). Крім того, чим коротше важіль, тим більше величина максимальної виробленої потужності P_{max} .

На рисунку з індексами «1» наведені залежності $P_{вс} = f(t)$ і $E_a = f(t)$ при $l_p = 1,5$ м, з індексами «2» – при $l_p = 2$ м, з індексами «3» – при $l_p = 3$ м. Параметр l_p не впливає на характер залежностей $P_{вс} = f(t)$, $E_a = f(t)$ і $P_{вс} = f(E_a)$.

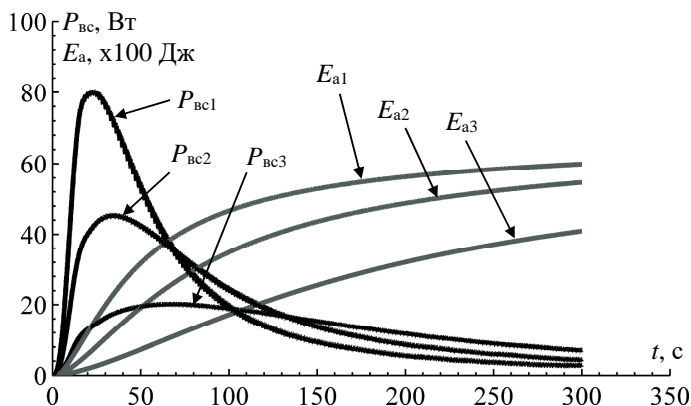


Рис. 3.11 – Моделювання роботи ХЕС при різних l_p

Ця властивість обумовлена тим, що короткий важіль забезпечує більшу швидкість обертання вала при слабкозарядженому гідроаккумуляторі й відповідно більшу вироблену потужність, що добре видно на графіку на проміжку 0...60 с. А в міру заповнення гідроаккумулятора момент опору вала збільшується й збільшення довжини важеля дає трохи більшу вироблену потужність, що чітко видно на проміжку 150...300 з на графіку.

При виборі довжини важеля слід урахувувати те, що кривизна його траєкторії по можливості повинна бути мінімальною при розрахункових амплітудах руху ГЕЕ, що забезпечується збільшенням l_p .

Змінимо момент інерції J вала ХЕС, і виконаємо моделювання (рис. 3.12).

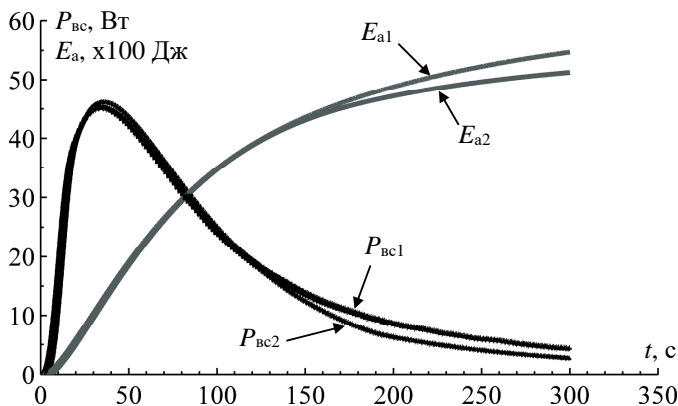


Рис. 3.12 – Моделювання роботи ХЕС при різних J

На рис.3.12 з індексами «1» наведені залежності $P_{вс} = f(t)$ і $E_a = f(t)$ при $J = 36,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, з індексами «2» – при $J = 700 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Параметр J не впливає на характер залежностей $P_{вс} = f(t)$, $E_a = f(t)$ і $P_{вс} = f(E_a)$, їхні чисельні значення також близькі, не дивлячись на суттєву різницю значень J . Більші значення J згладжують величину миттєвої виробленої потужності й забезпечуються збільшенням власної маси вала або встановленням маховика на вал ХЕС.

Змінимо коефіцієнт гідроакумулятора k_a й виконаємо моделювання (рис. 3.13).

На рисунку з індексами «1» наведені залежності $P_{вс} = f(t)$ і $E_a = f(t)$ при $k_a = 20$, з індексами «2» – при $k_a = 40$, з індексами «3» – при $k_a = 80$. Параметр k_a не впливає на характер залежностей $P_{вс} = f(t)$, $E_a = f(t)$ і $P_{вс} = f(E_a)$. Комп'ютерний експеримент із параметром k_a відкрив цікаву властивість ХЕС: чим більше величина k_a , тем меншу енергію E_a може накопичити гідроакумулятор і тем менший проміжок часу минеться до моменту досягнення максимальної виробленої потужності $P_{вс}$, крім того, параметр k_a практично не впливає на максимальне значення виробленої потужності P_{max} .

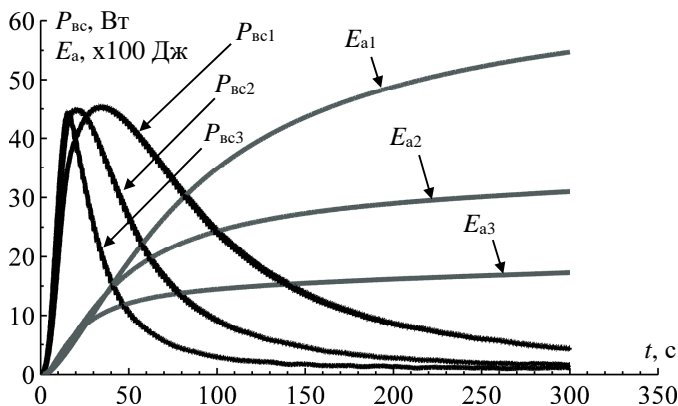


Рис. 3.13 – Моделювання роботи ХЕС при різних k_a

Результати моделювання роботи ХЕС показали, що характер залежностей $P_{вс} = f(t)$, $E_a = f(t)$ і $P_{вс} = f(E_a)$ при різних конструктивних параметрах не змінюється, що є важливою властивістю ХЕС і дає можливість синтезувати універсальні САК. Крім того, аналіз наведених залежностей дає можливість обґрунтовано вибирати оптимальні параметри ХЕС для одержання максимальної потужності при заданих параметрах хвилі.

3.2.3. Дослідження впливу довжини ГЕЕ й параметрів хвильового впливу на величину виробленої потужності ХЕС. Виконаємо моделювання роботи ХЕС, змінюючи довжину ГЕЕ й прийнявши параметри хвильового впливу, що відповідають значному (3-4 бала) хвилюванню [76] (рис. 3.14):

- амплітуда хвилі $A = 1$ м;
- частота хвилі $f = 4$ рад/с;
- швидкість розповсюдження хвилі $c = 5$ м/с.

Оскільки математична модель ХЕС урахує пружну деформацію ГЕЕ, то фактична його довжина в процесі моделювання може збільшуватися до 2% від величини $L_{л}$, тому, наприклад, при $L_p = 30$ м і $L_{л} = 30$ м ГЕЕ може розтягуватися до $L_{факт} = 30,6$ м.

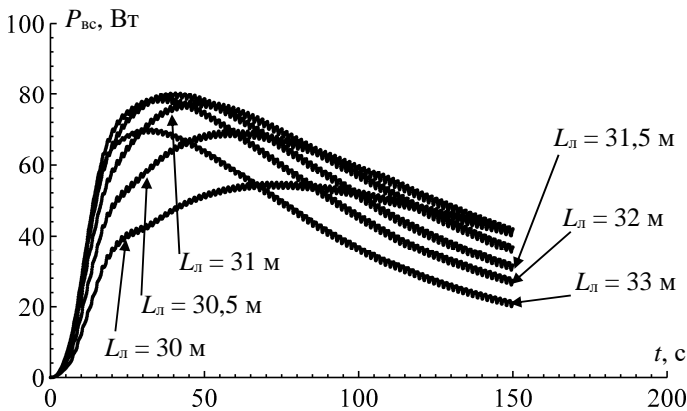


Рис. 3.14 – Моделювання роботи ХЕС при значному хвилюванні й різних $L_{д}$

На рис. 3.14 бачимо, що найбільше значення максимальної виробленої потужності $P_{max} = 80$ Вт забезпечується довжиною ГЕЕ $L_{д max} = 31,5$ м, збільшення або зменшення довжини ГЕЕ приводить до зменшення P_{max} .

Виконаємо моделювання роботи ХЕС, змінюючи довжину ГЕЕ й прийнявши параметри хвильового впливу, що відповідають сильному (5 балів) хвилюванню [76] (рис. 3.15):

- амплітуда хвилі $A = 1,7$ м;
- частота хвилі $f = 3$ рад/с;
- швидкість розповсюдження хвилі $c = 8$ м/с.

У цьому випадку максимальна вироблювана потужність $P_{max} = 256$ Вт забезпечується довжиною ГЕЕ $L_{д max} = 31$ м, і збільшення або зменшення довжини ГЕЕ також приводить до зменшення виробленої потужності P_{max} .

Зміна параметрів хвильового впливу й довжини ГЕЕ дають у кожному випадку схожий результат, тобто для кожного набору параметрів існує довжина ГЕЕ, що забезпечує найбільше значення величини P_{max} . Отримані результати дають можливість синтезувати САК довжиною ГЕЕ ХЕС.

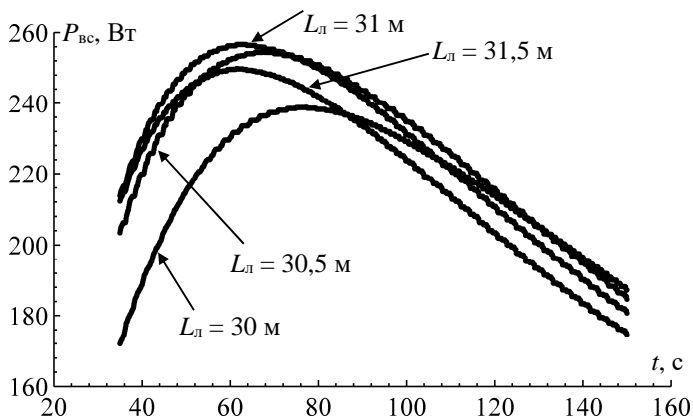


Рис. 3.15 – Моделювання роботи ХЕС при сильному хвилюванні й різних $L_{л}$

3.3. Синтез системи автоматичного керування первинним перетворювачем енергії хвильової електростанції на основі підбора довжини енергопоглинаючого елемента

Складність математичної моделі ХЕС, суттєві нелінійності її характеристик роблять непридатними підходи класичної теорії автоматичного керування для синтезу САК таким об'єктом. Для вирішення поставленої задачі необхідно розробити структуру САК, її алгоритмічне й математичне забезпечення з урахуванням особливостей об'єкта керування, виявлених у результаті його аналізу.

Особливості ХЕС роблять задачу забезпечення найбільшої величини виробленої потужності P_{max} у край складною. Розглянемо результати моделювання при параметрах хвильового впливу, відповідних до сильного хвилювання: $A = 1,7$ м, $c = 8$ м/с, $f = 2$ рад/с. На рис. 3.16 наведена залежність виду $P_{вс} = f(E_a)$. При довжині ГЕЕ $L_{л} = 30,5$ м забезпечується $P_{max} = 90$ Вт, тобто в цьому випадку $L_{л} = L_{л\ max}$.

Припустимо, що споживана потужність становить $P_{п} = 60$ Вт, тоді енергія гідроакумулятора складе $E_a = 9900$ Дж. Приймемо, що хвилювання моря зменшилося із сильного до значного з параметрами $A = 1$ м, $c = 5$ м/с, $f = 4$ рад/с, то-

ді енергія гідроакумулятора почне поступово зменшуватися до величини $E_a = 6000$ Дж (рис. 3.17).

Як бачимо, довжина ГЕЕ $L_d = 30,5$ м у цьому випадку не забезпечує максимально можливу величину P_{max} , але, проте, ХЕС буде виробляти достатню потужність для роботи підключеного навантаження. При цьому без попереднього дослідження роботи ХЕС неможливо однозначно визначити, чи забезпечує поточна довжина ГЕЕ максимум величини P_{max} і якщо ні, то як її потрібно змінювати. Крім того, якщо споживана потужність складе $P_n > 70$ Вт, то гідроакумулятор цілком розрядиться й ХЕС практично припинить виробляти енергію. У цьому випадку необхідно виконати підбір довжини ГЕЕ для забезпечення максимально можливої величини P_{max} . Алгоритм підбора величини $L_d = L_{d \max}$, що реалізує такий порядок дій при розряді гідроакумулятора, представлений на рис. 3.18.

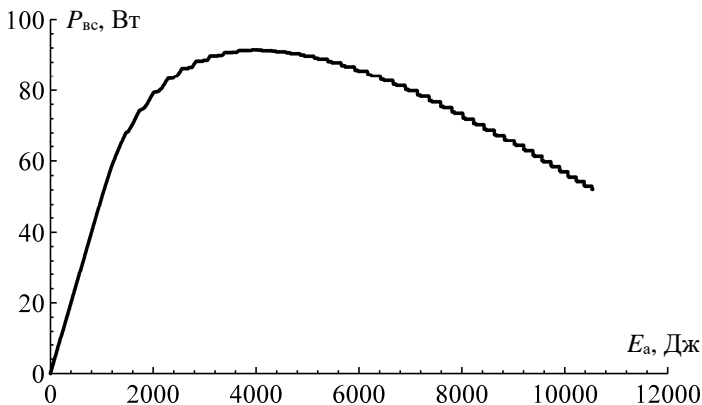


Рис. 3.16 – Моделювання роботи ХЕС при сильному хвилюванні й різних $L_d = 30,5$ м

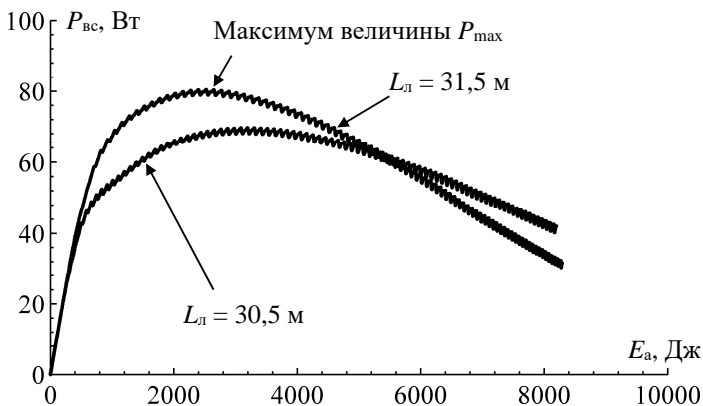


Рис. 3.17 – Моделювання роботи ХЕС при значному хвилюванні й різних $L_{\text{л}}$

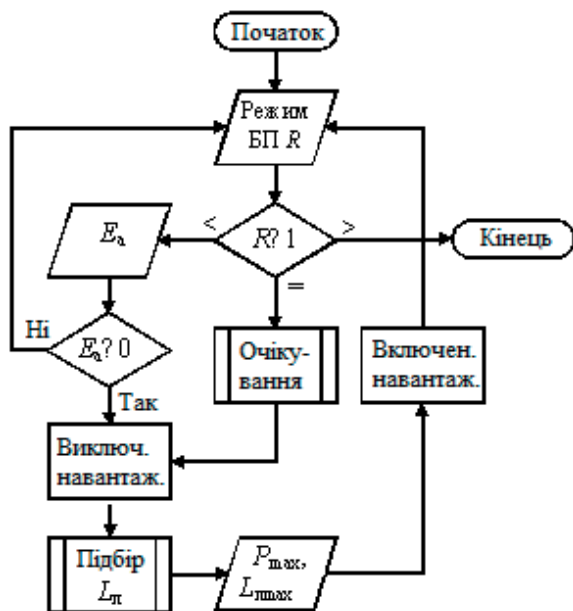


Рис. 3.18 – Алгоритм роботи САК ГЕЕ

Величина R визначає режим роботи блоку підбора (БП) величини $L_{\text{л}}$. При $R = 0$ виконується моніторинг величини заряду гідроакумулятора E_a . При пов-

ному його розряді відключається навантаження, тобто $P_n = 0$. Далі виконується підбір довжини ГЕЕ для забезпечення максимально можливої величини P_{max} . Після виводу P_{max} і $L_{л\ max}$ БП підключає навантаження і якщо режим не змінився, то продовжує виконувати моніторинг величини E_a . При $R = 1$ виконується підбір довжини ГЕЕ через фіксовані інтервали часу, при $R > 1$ БП завершує роботу.

Відключення навантаження є обов'язковою дією, оскільки інакше вироблена потужність і відповідно енергія гідроакумулятора будуть мати значення приблизно рівні нулю.

Безпосередньо підбір величини $L_{л}$ здійснюється по алгоритму, зображеному на рис. 3.19.

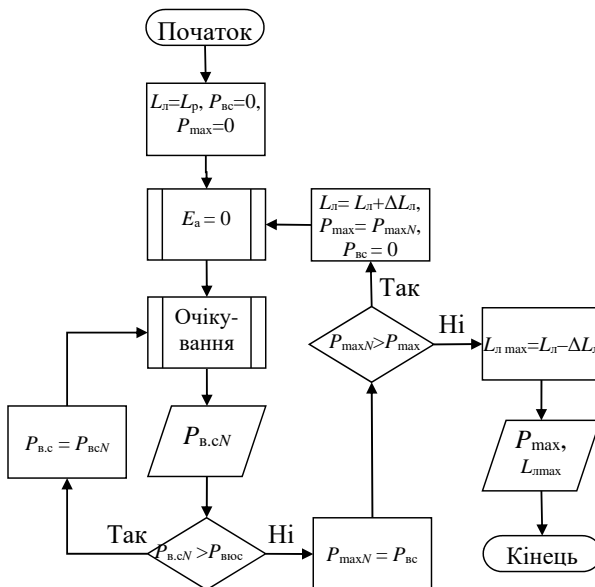


Рис. 3.19 – Алгоритм підбора величини $L_{л}$

У даному алгоритмі, насамперед, довжина ГЕЕ встановлюється рівній довжині несучої рами ХЕС $L_{\text{л}} = L_{\text{р}}$, а також скидаються значення середньої й максимально вироблених потужностей: $P_{\text{вс}} = 0$, $P_{\text{max}} = 0$. Далі розряджається гідроаккумулятор ($E_{\text{а}} = 0$) і запускається процедура очікування, у процесі якої гідроаккумулятор накопичує деяку енергію, і величина виробленої потужності приймає деяке значення, відмінне від нуля. Тривалість очікування повинна бути достатня для того, щоб накопичити достатню кількість миттєвих значень $P_{\text{в}}$ для усереднення, наприклад 10 с. Отримане усереднене значення зчитується й привласнюється змінній $P_{\text{всN}}$. Після припинення росту потужності блок порівняння $P_{\text{всN}} > P_{\text{вс}}$ переходить на гілку «Ні» і останнє значення $P_{\text{вс}}$ записується в змінну P_{maxN} – для поточної довжини ГЕЕ $L_{\text{л}}$ це і є величина максимальної виробленої потужності. Далі визначається, чи перевищує нова величина P_{maxN} її попереднє значення P_{max} . Якщо перевищує, то довжина ГЕЕ збільшується: $L_{\text{л}} = L_{\text{л}} + \Delta L_{\text{л}}$, де $\Delta L_{\text{л}}$ – крок зміни довжини ГЕЕ, гідроаккумулятор розряджається ($E_{\text{а}} = 0$) і алгоритм переходить на нову ітерацію. Розряд гідроаккумулятора обов'язковий, оскільки інакше не можна буде визначити значення P_{max} для нової величини $L_{\text{л}}$. Якщо $P_{\text{maxN}} < P_{\text{max}}$, то значення P_{max} є найбільшим і забезпечувалося величиною $L_{\text{л}}$ на попередньому кроці ітерації. Отже, довжина ГЕЕ, що забезпечує найбільшу P_{max} , знайдена й встановлюється рівною $L_{\text{л max}} = L_{\text{л}} - \Delta L_{\text{л}}$. Структура САК довжиною ГЕЕ ХЕС на основі БП представлена на рис. 3.20.

Енергопоглинаючий елемент є джерелом потужності $P_{\text{в}}$ залежно від довжини $L_{\text{л}}$, параметрів хвилі A , f , c і накопиченої гідроаккумулятором енергії $E_{\text{а}}$. Регулятор довжини ГЕЕ являє собою блок підбора величини $L_{\text{л}}$ і має можливість відключати споживача енергії за допомогою перемикача П від гідроаккумулятора, встановлюючи $P_{\text{п}} = 0$, або розряджати його, встановлюючи $P_{\text{п}} = \infty$ і відповідно $E_{\text{а}} = 0$, у такий спосіб забезпечуючи роботу САК відповідно до розробленого алгоритму. Блок усереднення (БУ) необхідний для усереднення миттєвих значень виробленої потужності, оскільки величина $P_{\text{в}}$ при більших значеннях накопиченої енергії $E_{\text{а}}$ змінюється в широких межах з великою частотою. Режим роботи БП визначає, чи буде величина $L_{\text{л}}$ підбиратися періодично

через обраний проміжок часу або по необхідності при зміні параметрів хвилі, що тягнуть за собою повний розряд гідроакумулятора.

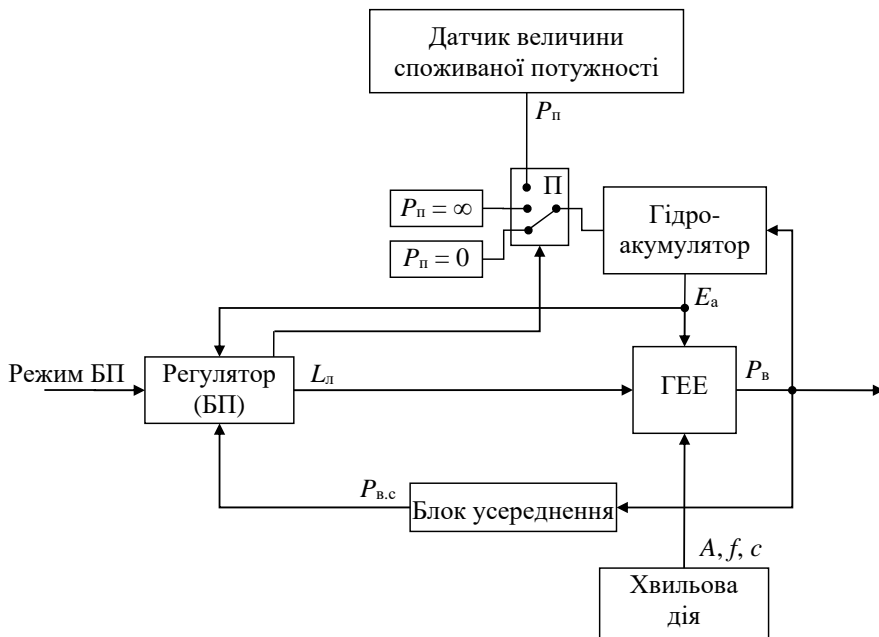


Рис. 3.20 – Структура САК довжиною ГЕЕ на основі БП

3.4. Синтез системи автоматичного керування первинним перетворювачем енергії хвильової електростанції на основі штучної нейронної мережі

При використанні в якості регулятора довжини ГЕЕ блоку підбора величини L_{Π} з кожною суттєвою зміною параметрів хвилі необхідно запускати процедуру підбора L_{Π} , що спричиняє тимчасові витрати без одержання енергії. Крім того, якщо параметри хвилі змінилися у бік збільшення виробленої потужності, то для з'ясування цього також необхідно запускати процедуру підбора. Усунути ці недоліки САК пропонується з використанням засобів штучного інтелекту.

Виконаємо моделювання роботи ХЕС із блоком підбора довжини ГЕЕ $L_{\text{лmax}}$, змінюючи параметри хвильового впливу в межах значного й сильного хвилювань (4 – 6 балів). При цьому $A = 1, 2, 3$ м, $c = 5, 7,5, 10$ м/с, $f = 1, 2, 3$ рад/с (табл. 3.1), крок добору $\Delta L_{\text{л}}$ приймемо 0,5 м.

Таблиця 3.1 – Результати моделювання ХЕС із блоком підбора довжини ГЕЕ $L_{\text{лmax}}$

N	A , м	c , м/с	f , рад/с	$L_{\text{в}}$, м	t_{max} , с	$L_{\text{лmax}}$, м	P_{max} , Вт	$E_{\text{а}}$, Дж
1	1	5	1	101,0	35	100,5	5,1	120
2			2	103,9	39	101,5	32,7	873
3			3	108,4	40	104,0	84	2200
4	1	7.5	1	100,5	35	100,5	4,5	116,7
5			2	101,8	61	100,5	37	1486
6			3	103,9	39	101,5	104	2906
7	1	10	1	100,3	26	100,0	5,2	104
8			2	101,0	43	100,5	43	1445
9			3	102,2	45	100,5	124	4977
10	2	5	1	104,0	48	101,5	41,4	1409
11			2	114,3	53	104,5	211	8073
12			3	129,8	70	111,0	467	24638
13	2	7.5	1	101,8	42	101,0	44,3	1371
14			2	106,8	69	102,0	286	14634
15			3	114,3	67	104,5	690	43867
16	2	10	1	101	38	100,5	44	1256
17			2	104	67	101,5	317	18422
18			3	108,4	80	102,5	902	53566
19	3	5	1	108,6	55	103	133,6	5215
20			2	129,3	90	108	670	45340
21			3	157,8	80	125	1440	84549
22	3	7.5	1	104	49	101,5	143	5132
23			2	114,5	81	104,5	910	53756

24			3	129,3	90	111	2153	146329
25	3	10	1	102,3	60	101	143	5566
26			2	108,6	105	103	1012	64395
27			3	117,8	110	106	2846	235161

У таблиці прийняті такі позначення: L_B – довжина поверхні хвилі; t_{max} – час, затрачене на досягнення максимуму виробленої потужності P_{max} при поточних параметрах хвилі й значенні $L_{л\ max}$; E_a – енергія гідроакумулятора, відповідна до значення P_{max} . Величина t_{max} дає можливість приблизно оцінити час t , необхідне на підбір величини $L_{л\ max}$ при поточних параметрах хвилі й кроці підбора $\Delta L_{л}$:

$$t \approx \left(\frac{L_{л\ max} - L_p}{\Delta L_{л}} + 1 \right) t_{max}.$$

Величина E_a дає можливість оцінити необхідну енергоємність гідроакумулятора для забезпечення P_{max} при відповідних параметрах хвильового впливу.

Результати моделювання відкрили найважливішу закономірність для роботи САК механічної частини ХЕС – величина $L_{л\ max}$ залежить від довжини поверхні хвилі L_B , при цьому вплив конкретних значень A, f, c несуттєво:

$$L_{л\ max} = f(L_B). \quad (3.1)$$

На рис. 3.21 зображена залежність (3.1), отримана за даними табл. 3.1.

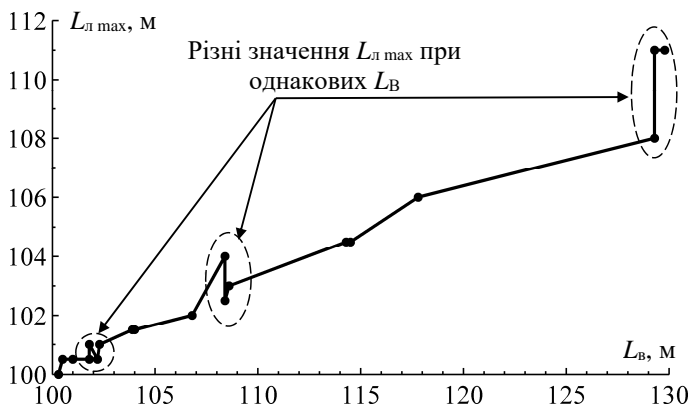


Рис. 3.21 – Зображення залежності $L_{л\max} = f(L_{в\max})$

На графіку бачимо, що в деяких місцях присутня неоднозначність залежності (3.1): при приблизно однакових значеннях $L_{в\max}$ величини $L_{л\max}$ суттєво відрізняються. Виконаємо моделювання роботи ХЕС при параметрах хвилі, відповідних до рядків $N = 18, 19$ і 26 , прийнявши $L_{л\max} = 104$ м, відповідну до значення в рядку $N = 3$ (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Результати моделювання ХЕС при $L_{л\max} = 104$ м.

N	A , м	c , м/с	f , рад/с	$L_{в\max}$, м	$L_{л\max}$, м	P_{\max} , Вт	P_{\max} при $L_{л\max} = 104$ м, Вт
3	1	5	3	108,4	104,0	84	84
18	2	10	3	108,4	102,5	902	865
19	3	5	1	108,6	103	133,6	133,2
26	3	10	2	108,6	103	1012	1011

Результати моделювання показали, що вироблена потужність у цих і аналогічних випадках при $L_{л\max} = 104$ м відрізняється не більше ніж на 5%, від потужності, яку можна одержати, прийнявши $L_{л\max} = 102,5, 103$ м. Це дає можливість одержати залежність $L_{л\max} = f(L_{в\max})$, виключивши неоднозначності. Крім

цього, виконаємо підбір $L_{л\ max}$ при $L_{в} = 112$ і 124 м, щоб залежність була більш повною (рис. 3.22).

Для обчислення значення $L_{л\ max}$ у проміжних точках скористаємося апроксимацією отриманих табличних даних за допомогою штучної нейронної мережі (ШНМ) [77]. У якості ШНМ була обрана нейронна мережа із прямим розповсюдженням сигналу й зворотним розповсюдженням помилки (feedforward backpropagation network), для навчання була обрана функція помилки навчання Левенберга-Маркардта (Levenberg-Marquardt backpropagation network training function). У якості функції активації був обраний сигмоїд (гіперболічний тангенс). Синтезована ШНМ містить три сховані шари в кожному по 5, 10 і 5 нейронів відповідно. На рис. 3.23 зображена синтезована ШНМ у середовищі Simulink пакета Matlab.

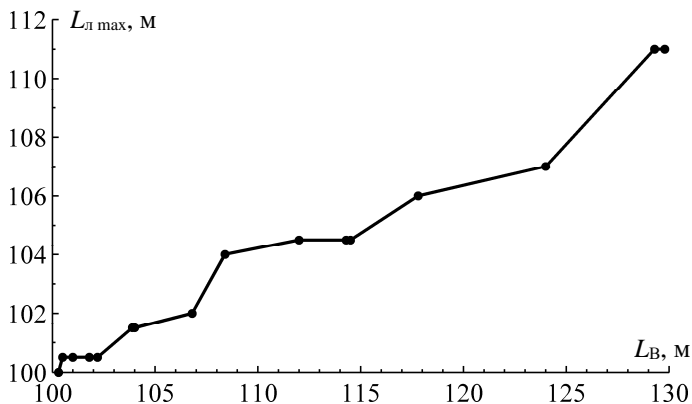


Рис. 3.22 – Зображення залежності $L_{л\ max} = f(L_{в})$

з виключенням неоднозначностей

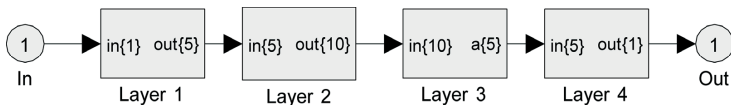


Рис. 3.23 – Багатошарова структура синтезованої ШНМ

У якості параметра «In» задається величина L_v , на виході «Out» одержуємо розраховану L_d . Приховані шари позначені «Layer 1», «Layer 2» і «Layer 3». Шар «Layer 4» є вихідним і містить один нейрон. Кожен шар містить вхід «in{ n » і вихід «out{ m », де n і m – розміри векторів відповідно вхідного й вихідного сигналу шару.

Кожен шар ШНМ має внутрішню структуру, зображену на прикладі першого шару на рис. 3.24 і утримуючу блоки зсуву (bias), вагових коефіцієнтів (weight), додавання векторів (netsum) і трансфер-функцію (tansig).

Блок зсуву $b\{m\}$ містить вектор констант, де m – їх кількість. Для кожного шару величина m відповідає кількості нейронів у ньому. Блок вагових коефіцієнтів $IW\{m\}$ також містить у собі m елементів, складається із блоків ваг «weights», блоків скалярних добутків «dotprod», блоку «Mux» і зображений рис. 3.25 (на прикладі першого шару).

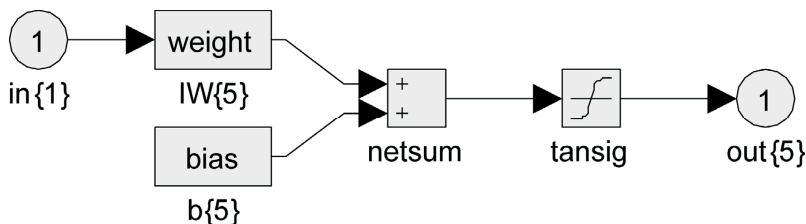


Рис. 3.24 – Структура шару ШНМ

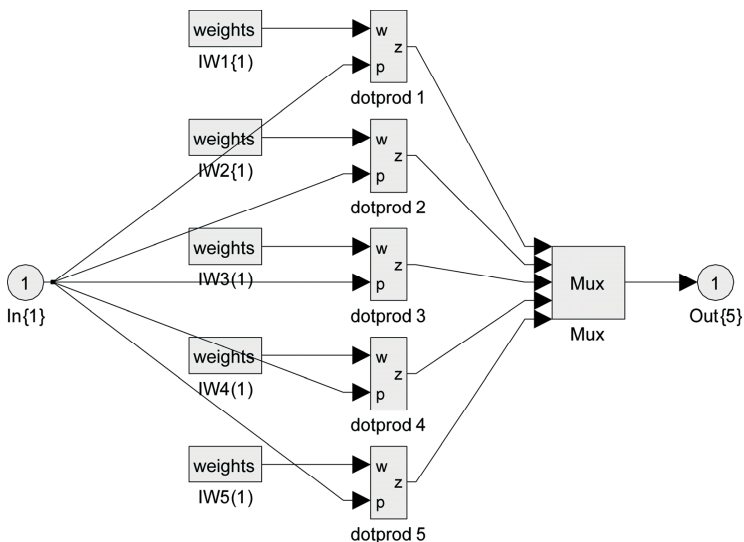


Рис. 3.25 – Структура блоку вагових коефіцієнтів ШНМ

Блоки ваг «IW i { n }}» являють собою вектори констант, де i – номер блоку, n – розмір вектора констант. Блок «Mux» формує з декількох вхідних значень вихідний вектор, його розмір m ми можемо побачити в блоці «Out{ m }}».

Залежність $L_{\text{лmax}} = f(L_B)$, реалізована на основі нейронної мережі, має вигляд, представлений на рис. 3.26.

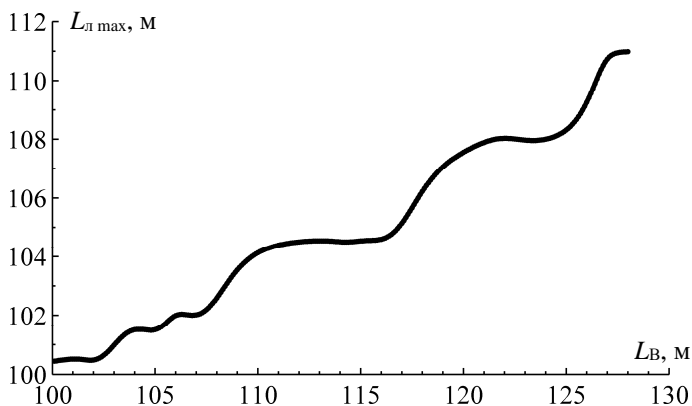


Рис. 3.26 – Зображення залежності $L_{\text{лmax}} = f(L_B)$,
реалізованої на основі ШНМ

Результати моделювання роботи ХЕС при різних параметрах хвилі показали, що при розрахунках величини $L_{л\ max}$ залежно від величини L_B за допомогою синтезованої ШНМ вироблена потужність P_{max} лежить у межах 91-100% її найбільшого значення, що задовольняє поставленій задачі.

Структура САК довжиною ГЕЕ на базі ШНМ представлена на рис. 3.27.

Режим САК задає значення величини R . Блок вибору режиму R виконує включення й відключення відповідних регуляторів. При $R = 0$ або $R = 1$ довжина ГЕЕ регулюється за допомогою БП по відповідному до алгоритму (рис. 3.18, 3.19). При цьому в ШНМ накопичуються дані у формі залежності $L_{лmax} = f(L_B)$ і виконується її навчання. Після завершення навчання задається режим $R = 2$, відповідний до керування довжиною ГЕЕ за допомогою навченої ШНМ. При необхідності можна виконати донавчання нейронної мережі, перейшовши в режим $R = 0$ або $R = 1$. Для спрощення структури деякі зв'язки БП із ГЕЕ й гідроаккумулятором, зображені на рис. 3.20, тут не показані. Таким чином, розроблена САК складається з регуляторів на основі блоку підбора довжини ГЕЕ й ШНМ і забезпечує керування довжиною ГЕЕ залежно від параметрів хвильового впливу.

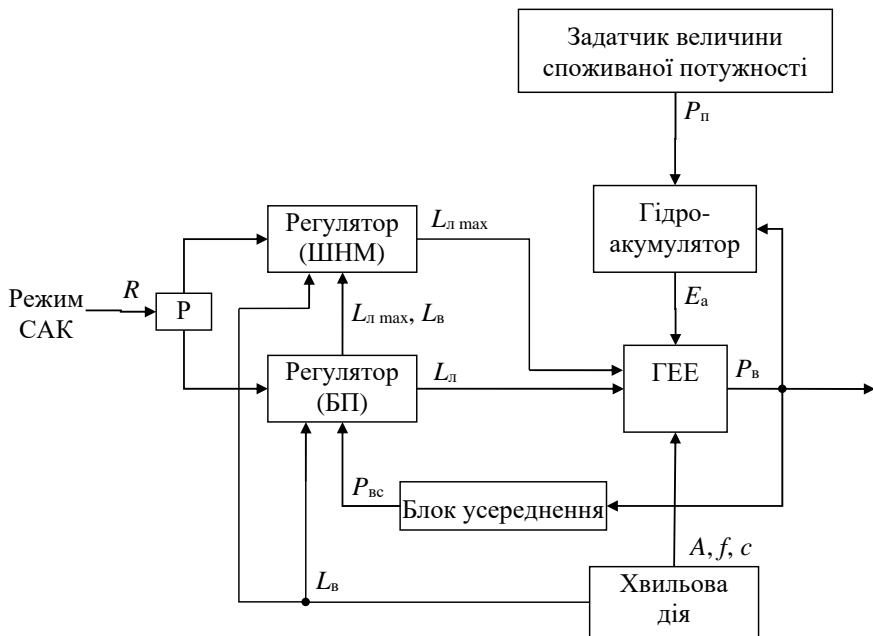


Рис. 3.27 – Структура САК довжиною ГЕЕ на основі БП і ШНМ

Запитання для самоаналізу

1. Якими параметрами характеризується механічна частина ХЕС?
2. Якими параметрами характеризується робота ХЕС?
3. Як пов'язані вироблювана потужність і накопичена енергія гідроакумулятора?
4. Як впливає зміна механічних параметрів ХЕС на вироблену потужність?
5. Опишіть алгоритм роботи системи автоматичного керування ГЕЕ.
6. Опишіть алгоритм підбора величини довжини ГЕЕ.
7. Що входить до складу структури системи автоматичного керування ГЕЕ?
8. Що входить у структуру штучної нейронної мережі?
9. Опишіть структуру системи автоматичного керування довжиною ГЕЕ на базі штучної нейронної мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Росс Д. Энергия волн. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 112 с.
2. Коробков В. А. Преобразование энергии океана. Л.: Судостроение, 1986. 280 с.
3. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П. П. Безруких и др. СПб.: Наука, 2002. 314 с.
4. Безруких П. П., Стребков Д. С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. 264 с.
5. Michael E. McCormick. Ocean Wave Energy Conversion. New York: Wiley publisher, 1981. 233 p.
6. Гибилиско С. Альтернативная энергетика без тайн / пер. с англ. А. В. Соловьева. М.: Эксмо, 2010. 368 с.
7. Оборудование нетрадиционной и малой энергетике: справочник-каталог / под ред. Ю. Д. Арбузова. Второе издание. М.: Новые и возобновляемые источники энергии, 2002. 167 с.
8. Сичкарев В. И., Акуличев В. А. Волновые энергетические станции в океане. М.: Наука, 1989. 132 с.
9. Удалов С. Н. Возобновляемые источники энергии: учебник. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 432 с.
10. Использование волновой энергии: учеб. пособие / В. И. Виссарионов, В. В. Волшаник, Л. А. Золотов и др.; под ред. В. И. Виссарионова. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 144 с.
11. Энергетические ресурсы мира / под ред. П. С. Непорожного, В. И. Попкова. М.: Энергоатомиздат, 1995. 232 с.
12. Yeung L. F., Hodgson Paul, Bradbeer Robin. Generating electricity. Using Ocean Waves. A Renewable Source of Energy. Hong Kong: Electric Company Limited, 2007. 66 p.
13. Research into the further Development of the limpet Shoreline Wave Energy Plant. ETSU V/06/00183/REP. URN 02/1487. Crown Copyright, 2002. 37 p.

14. Paolo Boccotti. Wave Mechanics for Ocean Engineering. Elsevier Oceanography Series. Feo di Vito, Italy: University of Reggio-Calabria, 2000. 496 p.
15. Waters R. Energy from Ocean Waves. Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter. Uppsala, Sweden: Dissertation of Uppsala Universitat, 2008. 133 p.
16. Rahm M. Ocean Wave Energy. Underwater Substation System for Wave Energy Converters. Uppsala, Sweden: Dissertation of Uppsala Universitat, 2010. 114 p.
17. Holthuijsen Leo. H. Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press, 2007. 387 p.
18. Dean Robert G., Dalrymple Robert A. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. World Scientific Publishing Co. Ric. Ltd, USA, 2000. 353 p. (Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 2).
19. Tedd, James. Testing, Analysis and Control of Wave Dragon, Wave Energy Converter: PhD Thesis. Denmark, Aalborg University, 2007. 116 p.
20. International Energy Agency. Implementing Agreement on Ocean Energy Systems: Annual Report. OES, 2008. 107 p.
21. Results from the Work of the European Thematic Network on Wave Energy. European Community. ERK5-CT-1999-20001. WaveNet, 2003. 502 p.
22. Paula Bastos Garcia Rosa. Controle e Otimizacao de um Sistema de Conversao de Energia das Ondas do Mar em Energia el Etrica. Dissertacao Submetida ao Corpo Docente da Coordenacao dos Programas de Pos-Graduacao de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2008. 135 p.
23. Плавающий предостерегательный знак с инерционно-поршневой волновой энергетической установкой / М. Л. Богданович, Е. П. Гладских, Ю. А. Глухов, В. А. Максимов // Навигация и гидрография, 2009. № 28. С. 30–35.
24. Dandekar M. M., Sharma K. N. Water power engineering. Vikas, 1979. 451 p.
25. Калинин Ю. Я., Дубинин А. Б. Нетрадиционные способы получения энергии. Саратов: СПИ, 1983. 70 с.
26. Peppas, Lynn. Ocean, Tidal, and Wave Energy: Power from the Sea. Crabtree Publishing Company, 2008. 32 p.
27. Вершинский Н. В. Энергия океана. М.: Наука, 1986. 152 с.

28. Магомедов А. М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Махачкала: АОЗТ Юпитер, 1996. 245 с.
29. Сидоренко В. С. Гидравлический волновой двигатель. Авт. св-во СССР №72103. Заявлено 23.11.1939 г.
30. Сотников А., Капитанчук К., Овсянкин В. Один из путей независимого энергетического обеспечения подразделений вооруженных сил Украины приморского базирования // Журнал «Арсенал», 2007. №1. С. 37–41.
31. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том IV: Черное море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия / под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 429 с.
32. Овсянкін В. В. Пристрій для перетворення енергії хвиль водної поверхні. Деклараційний патент України №56481. МКИ⁷ F03B13/12. Бюл. №5, 2003 р.
33. Blintsov V., Gertov S. Design problems of creation of wave power stations // Renewable Energy Based Units and Systems. St. Petersburg, Russia, 2006, June 25–28. P. 48–50.
34. Holthuijsen Leo. H. Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press, 2007. 387 p.
35. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 256 с.
36. Драган Я. П., Рожков В. А., Яворский И. Н. Методы вероятностного анализа ритмики океанологических процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 319 с.
37. Dean Robert G., Dalrymple Robert A. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. World Scientific Publishing Co. Ric. Ltd, USA, 2000. 353 p. (Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 2).
38. Cruz Joao. Ocean Wave Energy: Current Status and Future Prespectives (Green Energy and Technology). Springer, 2008. 431 p.
39. Charlier Roger H., Finkl Charles W. Ocean Energy. Tide and Tidal Power. Springer, 2009. 270 p.
40. Falnes Johaness. Ocean waves and oscillating systems. Cambridge university press, 2002. 275 p.

41. Drew B., Plummer A. R., Sahinkaya M. N. A review of wave energy converter technology // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2009. P. 887–902.

42. Пат. України №57968. МПК F03B13/12 (2006.1). Пристрій для перетворення енергії хвиль водної поверхні / В. С. Блінцов, Нгуен Тхань Хай. № 57968; заявл. 10.08.2010; опубл. 25.03.2011. Бюл. №6.

43. Нгуен Тхань Хай. Задачі автоматичного керування хвильовою електростанцією з важливими енергосприймаючими елементами // Інформаційно-керуючі системи і комплекси: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених. Миколаїв: НУК, 2009. С. 92–94.

44. Блинцов В. С., Нгуен Тхань Хай Автоматизация режимов работы волновой электростанцией // Проблемы автоматизированного электропривода: теория и практика. Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. С. 338-339.

45. Блинцов В. С., Нгуен Тхань Хай. Основные направления автоматизации управления волновыми электростанциями // «Збірник наукових праць НУК», 2010. №6. С. 121–130.

46. Пат. України №61027. МПК F03B13/12 (2006.1). Пристрій для перетворення енергії хвиль водної поверхні / В. С. Блінцов, Нгуен Тхань Хай. № 61027; заявл. 15.11.2010; опубл. 11.07.2011. Бюл. № 13.

47. Баранов А. П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1988. 328 с.

48. Блинцов В. С., Краснов В. В. К вопросу о последовательной работе синхронных генераторов // Известия высших учебных заведений. Энергетика, 1972. С. 9–15.

49. Блинцов В. С., Нгуен Тхань Хай. Особенности управления электроэнергетической системой с последовательно включенными синхронными генераторами // Східно-Європейський журнал передових технологій, 2011. №3. С. 18–24.

50. Токаренко К. М., Терских В. З., Столяров А. Л. Гидропривод и гидрооборудование автотранспортных средств: учебн. пособие. К.: Лыбидь, 1991. 232 с.

51. Нейронні мережі в системах автоматизації / В. І. Архангельський, І. М. Богаєнко, Г. Г. Габровський, М. О. Рюмшин. К.: Техніка, 1999. 364 с.

52. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / В. Л. Александров; под ред. Ю. И. Нечаева. СПб.: ГМТУ, 2001. 395 с.
53. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления: научное издание / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов. М.: Наука, 2006. 333 с.
54. Краснов В. В., Михайлов В. С., Пискунов А. М., Чекунов К. А. Электрическая установка для судов-электроходов. Авт. св-во СССР №306527 от 23 марта 1971 г.
55. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 311 с.
56. Гостев В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления. К.: Радиоаматор, 2003. 512 с.
57. Системы функции-управления / Архангельский В. И., Богаенко И. Н., Грабовский Г. Г., Рюмшин Н. А. Киев: Техника, 1997. 208 с.
58. Звенигородский А. С. Нечеткая логика в управлении мобильным роботом // Искусственный интеллект, 1998. № 1. С. 63–67.
59. Современная прикладная теория управления. Оптимизационный подход в теории управления. Ч. 1. / под ред. А. А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 400 с.
60. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: 3-х т. / под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2000.
61. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике: учеб. для вузов / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 496 с.
62. Медведев В. С., Потемкин В. Г. MATLAB 6 / под общ. ред. В. Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. 496 с.
63. Энергетические ресурсы и потоки / под ред. акад. А. К. Шидловского. К.: Украинские энциклопедические знания, 2003. 472 с.
64. Блинцов В. С., Магула В. Э. Проектирование самоходных привязных подводных систем. К.: Наукова думка, 1997. 140 с.

65. Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики / Н. И. Виноградов, М. Л. Гутман, И. Г. Лев, М. З. Нисевич. СПб., 2000. 324 с.
66. Блінцов О. В. Моделі і алгоритми розрахунку характеристик кабель-тросу самохідної прив'язної підводної системи як об'єкта керування // Електротехніка і електромеханіка: матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених з міжнародною участю. Миколаїв: НУК, 2007. С. 296–300.
67. Блинцов А. В., Нгуен Тхань Хай. Математическое моделирование энергопоглощающего элемента волновой электростанции // Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. Миколаїв: НУК, 2011. С. 72–75.
68. Справочник по теории корабля: в 3-х т. / под ред. Я. И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. Т. 1. 768 с.
69. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов. 2-е изд., исправл. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1964. 848 с.
70. Дунаев П. Ф., Леликов О. П. Конструирование узлов и деталей машин. М.: Высшая школа, 1985.
71. Pump Handbook. Third edition / I. J. Karassic, J. P. Messina, P. Cooper, C. C. Heald. NY: McGraw-Hill, 2001.
72. Kundur P. Power System Control and Stability. NY: McGraw-Hill Inc., 1994. 1199 p. (Power System Engineering Series).
73. Веретенников Л. П. Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы. Л.: Судостроение, 1975. 320 с.
74. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. М.: Машиностроение, 1973. 606 с.
75. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. К.: Либідь, 2007. 656 с.
76. Безруков Ю. Ф. Колебания уровня и волны в Мировом океане: уч. пособие. Симферополь: Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского, 2001. 50 с.
77. Нейронні мережі в системах автоматизації / В. І. Архангельський, І. М. Богаєнко, Г. Г. Габровський, М. О. Рюмшин. К.: Техніка, 1999. 364 с.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 Принципи побудови хвильових електростанцій і особливості керування ними	
1.1 Огляд і критичний аналіз сучасних хвильових електростанцій.....	5
1.2 Короткий аналіз морських хвиль як джерела гідравлічної енергії.....	17
1.3 Удосконалювання структури ХЕС із гнучкими енергопоглинаючими елементами.....	20
1.4 Коротка характеристика ХЕС із гнучким енергопоглинаючим елементом як об'єкта керування Запитання для самоаналізу	25 30
2 Розробка математичного й апаратного забезпечення для дослідження ефективності системи автоматичного керування хвильовою електростанцією	
2.1 Постановка задачі.....	32
2.2 Розробка й обґрунтування структури спеціалізованого моделюючого комплексу для дослідження ефективності САК ХЕС.....	34
2.3 Розробка математичних моделей елементів ХЕС	36
2.4 Експериментальні дослідження макета ХЕС в дослідному басейні Запитання для самоаналізу	66 81
3 Синтез системи автоматичного керування первинним перетворювачем енергії хвильової електростанції	
3.1 Основні параметри механічної частини хвильової електростанції як об'єкта керування	82
3.2 Дослідження властивостей механічної частини хвильової електростанції як об'єкта керування	83
3.3 Синтез системи автоматичного керування первинним перетворювачем енергії хвильової електростанції на основі підбора довжини енергопоглинаючого елемента.....	95
3.4 Синтез системи автоматичного керування первинним перетворювачем енергії хвильової електростанції на основі штучної нейронної мережі..... Запитання для самоаналізу	100 108
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	109

Навчальне видання

ХВИЛЬОВА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ З ГНУЧКИМ ЕНЕРГОПОГЛИНАЮЧИМ ЕЛЕМЕНТОМ

Навчальний посібник

*За загальною редакцією
доктора технічних наук, професора В. С. Блінцова*

Формат 60×84¹/₁₆. Ум. друк. арк. 6,7. Тираж 100 пр. Зам. № 534-568.

ВИДАВЕЦЬ І ВИГОТОВЛЮВАЧ
Товариство з обмеженою відповідальністю фірма «Іліон».
54038, м. Миколаїв, вул. Бузника, 5/1.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1506 від 25.09.2003 р.